



**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Joonas Hartonen

## **Kattohuopajätteen uusiokäyttö asfalttimassassa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.11.2015

Valvoja: Professori Terhi Pellinen

Ohjaaja: Terhi Pellinen

---

**Tekijä** Joonas Hartonen

---

**Työn nimi** Kattohuopajätteen uusiokäyttö asfalttimassassa

---

**Koulutusohjelma** Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

---

**Pää-/sivuaine** Liikenne- ja tietekniikka

---

**Koodi** R3004

---

**Työn valvoja** professori Terhi Pellinen

---

**Työn ohjaaja(t)** professori Terhi Pellinen

---

**Päivämäärä** 30.11.2015

**Sivumäärä** 35

---

**Kieli** suomi

### Tiivistelmä

Kierrätetty huopakattorouhe on joko purkujätteestä tai huopakatteen valmistuksessa syntyneestä jätteestä rouhittua materiaalia, jota on ulkomailla käytetty asfalttimassan lisäaineena jo kymmeniä vuosia. Ulkomaiset laatuvaatimukset ja luokitusperusteet päällysteelle poikkeavat merkittävästi suomalaisista, joten aiempaa tutkimusta ei voida käyttää huopakattorouheen käyttökelpoisuuden arvioinnissa sellaisenaan.

Tässä diplomityössä tutkittiin huopakattorouheen käyttömahdollisuuksia suomalaisten päällystealan laatuvaatimusten puitteissa. Lisäksi vertailun mahdollistamiseksi huopakattorouheesta valmistetun asfalttimassan sisältämää sideainetta tutkittiin sen reologisten ominaisuuksien selvittämiseksi.

Tutkimusta varten hankittiin poranäytteitä kierrätettyä huopakattorouhetta sisältävästä AB 16-massasta. Lisäksi käytössä oli näyte-erä hierrätettyä kattohuoparouhetta. Laboratoriossa valmistettiin koekappaleita poranäytteiden kiviaineksesta, kierrätetystä kattohuoparouheesta ja pehmeästä 160/220-sideaineesta.

Koekappaleiden jäykkyys, epäsuoravetolujuus ja fyysiset ominaisuudet tutkittiin. Koekappaleista uutettiin sideaine ja tutkittiin kiviaineksen rakeisuus. Uutettujen sideainenäytteiden tunkeuma, pehmenemispiste ja Fraass-murtumapiste mitattiin. Reologiset tutkimukset koostuivat taajuuspyyhkäisystä, lineaarisesta amplitudipyyhkäisystä ja MSCR-virumapalutumakokeesta. Lisäksi kierrätetyn huopakattorouheen sideainepitoisuus määritettiin ja rouheesta uutetun sideaineesta tutkittiin samat ominaisuudet kuin koekappaleistakin uutetusta.

Tutkimustulosten perusteella voitiin todeta, että kierrätettyä huopakattorouhetta sisältävä asfalttimassa voi täyttää suomalaiset laatuvaatimukset, mutta näiden vaatimusten ulkopuolelle jäävät ominaisuudet saattavat vaikuttaa massan käytettävyyteen. Tarkempia laboratoriotutkimuksia suositellaan kylmäkestävyyden ja kulutuskestävyyden selvittämiseksi. Lisäksi kenttätutkimus aiheesta toisi lisätietoa kierrätetyn huopakattorouheen käyttäytymisestä tie- ja katupäällysteessä.

---

**Avainsanat** kierrätys, huopakattorouhe, uusioasfaltti, bituminen sideaine

---



<b>Author</b> Joonas Hartonen		
<b>Title of thesis</b> Application of recycled asphalt made of roof shingles		
<b>Degree programme</b> Transportation and environmental engineering		
<b>Major/minor</b> Transportation and highway engineering		<b>Code</b> R3004
<b>Thesis supervisor</b> Professor Terhi Pellinen		
<b>Thesis advisor(s)</b> Professor Terhi Pellinen		
<b>Date</b> 30.11.2015	<b>Number of pages</b> 35	<b>Language</b> Finnish

### **Abstract**

Recycled asphalt shingles (RAS) are made from either tear-off pieces of asphalt shingles or post-manufacturer scrap. They have been studied and used in hot-mix-asphalt (HMA) for decades overseas, but the different standards and classification methods make it hard to utilize previous study results in assessing the usability and standards compliance of RAS in Finland.

The objective of this study was to investigate the possibilities of using RAS in Finnish standard-compliant HMA mixtures. In addition, extracted binder from HMA with an RAS component was studied using a dynamic shear rheometer (DSR).

For the study, core samples of AC 16 surf with RAS content and a sample of RAS material were obtained and studied. In addition, additional mixture samples were fabricated using the aggregate of the core samples, the RAS material and a soft 160/220 penetration graded binder.

The mixture samples were studied for their stiffness, indirect tensile strength and physical properties. The stiffness, indirect tensile strength and physical properties of the mixture samples were measured. The binder from the mixture samples was extracted and the binder samples were analyzed for their penetration, softening point and Fraass breaking point. Using the DSR, frequency sweep, linear amplitude sweep and MSCR analyses were performed on the extracted binder samples. Additionally, the RAS material was analyzed for its binder content and the extracted binder from the RAS was analyzed with the same methods as the mixture binder samples.

The results showed that HMA mixtures containing RAS can meet the Finnish standards, but properties not included in these standards might have an effect on the usability of the mixes. Further research is recommended to study cold temperature effects and deformation resistance of HMA mixtures containing RAS. Additionally field studies should be performed to study the performance of RAS in real life conditions.

---

**Keywords** recycling, RAS, recycled asphalt, bituminous binder

---

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun liikenne- ja tietekniikan koulutusohjelmassa. Diplomityön tilaaja oli Tarpaper Recycling Finland Oy, jonka uusi kierrätystekniikka oli tämän työn pohjana.

Diplomityön ohjaajana ja valvojana toimi professori Terhi Pellinen. Lisäksi työtä ohjasivat ja koejärjestelyissä auttoivat laboratoriomestarit Heli Nikiforow ja Petri Peltonen, Jarkko Valtonen ja Kalle Aromaa Aalto-yliopistosta. Kiitän heitä ja erityisesti professori Pellistä kannustavasta ja asiantuntevasta ohjauksesta ja avusta. Kiitän myös Tarpaper Recycling Finland Oy:tä työn tekemisen mahdollistamisesta ja tutkimusmateriaalista.

Erityiskiitos kuuluu Paula-Kaisalle, Nöpölle ja Puhvelille suuresta tuesta työn tekemisen aikana.

Espoo 30.11.2015

Joonas Hartonen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	1
Merkinnät ja lyhenteet.....	2
1 Johdanto .....	3
1.1 Työn tausta .....	3
1.2 Tutkimusongelma .....	5
1.3 Tutkimuksen tavoite .....	5
1.4 Tutkimuksen rakenne .....	5
1.5 Tutkimuksen rajaus .....	5
2 Kirjallisuuskatsaus .....	6
3 Laboratoriossa tutkittavat näytteet ja tutkimusmenetelmät.....	9
3.1 Tutkittavat näytteet.....	9
3.1.1 Poranäytteet huopakateasfalttimassasta .....	9
3.1.2 Huopakattorouhe .....	10
3.1.3 Huopakattorouheesta laboratoriossa valmistetut koekappaleet .....	10
3.2 Tutkimusmenetelmät .....	11
3.2.1 Asfalttimassatutkimukset .....	11
3.2.2 Tutkimukset huopakattorouheelle .....	12
3.2.3 Kiviainestutkimukset .....	12
3.2.4 Sideainetutkimukset .....	13
4 Tutkimustulokset.....	15
4.1 Asfalttimassatutkimukset .....	15
4.2 Tutkimukset huopakattorouheelle .....	18
4.3 Kiviainestutkimukset.....	19
4.4 Sideainetutkimukset .....	21
5 Tutkimustulosten tarkastelu .....	26
5.1 Asfalttimassatutkimukset .....	26
5.2 Kiviainestutkimukset.....	27
5.3 Sideainetutkimukset .....	28
6 Yhteenveto ja päätelmät.....	32
Lähdeluettelo .....	34

## Merkinnät ja lyhenteet

d	[m]	halkaisija
ESAL		standardiakseli
G*	[Pa]	kompleksimoduuli
h	[m]	korkeus
J <sub>nr</sub>	[1/kPa]	palautumaton virumismyötääminen
m	[g]	massa
N <sub>f</sub>		vaurioparametri, väsymisparametri
P	[N]	puristusvoima
R	[%]	palautumaprosentti
T	[°C]	lämpötila
TSI	[Pa]	epäsuora vetolujuus
TT	[%]	asfalttimassan sisältämä tyhjätila
V	[m <sup>3</sup> ]	tilavuus
VFB	[%]	kiviaineksen tyhjätilan täyttöaste
VMA	[%]	kiviaineksen tyhjätila
γ	[%]	leikkausmuodonmuutos
δ	[°]	vaihekulma
ρ	[g/m <sup>3</sup> ]	tiheys
τ	[Pa]	leikkausvoima
AASHTO		American Association of State Highway and Transportation Officials
AB16		asfalttibetoni, maksimiraekoko 16 mm
MSCR		Multiple Stress Creep Recovery
PANK		Päällystealan neuvottelukunta ry

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Kattohuopa tai huopakate on vedeneristysmateriaali, jota käytetään vesikaton uloimpana kerroksena. Sitä valmistetaan sekoittamalla mineraalimateriaaleja ja bitumia keskenään ja päällystämällä kuituhuopa tällä massalla.

Vuosittain Suomessa syntyy noin 13 000 – 18 000 tonnia kattohuopajätettä, josta Tuppurainen et al. (2014) mukaan noin 50 % on bitumia. EU-tasolla jätettä syntyy tuhatkertainen määrä kotimaiseen verrattuna. Kattohuopajätettä voidaan uusiokäyttää lähinnä uuden asfaltin valmistukseen sekä uuden kattohuovan valmistukseen. Suomessa kattohuopajäte on tähän asti ollut kaatopaikalle vietävää jätettä, josta osa on poltettu jätteenpolttolaitoksessa. Karkeasti arvioiden voidaan sanoa, että kattohuopajätteen vuosittaisella syntyasteella voitaisiin Suomessa asfalttipäällysteihin käytetystä 200 000 tonnista bitumia korvata noin 3-5 % kierrätetyllä huopakatteella.

Kattohuopajätteen uusiokäyttö on tähän asti ollut Suomessa olematonta, mutta vuodenvaihteessa 2014–2015 aloitti Lahdessa toimintansa tanskalaisen Tarpaper Recycling -yhtiön tytäryhtiö Tarpaper Recycling Finland Oy. Kuvassa 1 on yhtiön tuotantolaitoksen pihalla varastoitua huopakattojätettä, kuvassa 2 puolestaan rouhittua ja muusta purkujätteestä eroteltua karkeaa rouhetta. Karkeasta rouheesta valmistetaan vielä hienompaa rouhetta, joka on tuotannon lopputuote. Tuotantolaitoksessa sekoitetaan samassa suhteessa sekä purkujätteenä syntynyttä huopakatetta että huopakatetuotannon hukkapaloja, jolloin yhdistetyn rouheen sisältämä sideaine on pehmeämpää kuin pelkästä purkujätteestä valmistetun. Yhtiön mukaan kierrätetyn kattohuopajätteen käytöllä tiepäällysteissä voitaisiin neitseellisen bitumin ja tätä kautta raakaöljyn käyttöä vähentää, mikä aiheuttaisi huomattavia kustannussäästöjä (Tarpaper Recycling Finland Oy 2014).

Kierrätys sinällään ei ole uusi asia asfalttipäällysteiden valmistuksessa; kierrätettyä asfalttirouhetta on käytetty Suomessa 1920-luvulta asti, joskin käyttö on yleistynyt vasta 1970-luvulla, kuten Helena Lehtimäki kirjoittaa diplomityössään (2012). Lehtimäen mukaan Suomi on edelläkävijämaa asfalttimassojen kierrätyksessä, joten pohja kierrätettävien materiaalien kirjon kasvattamiseen on olemassa.

Mahdollisia ongelmia kattohuopajätteen uusiokäytössä ovat ainakin asbestin pääsyn estäminen materiaalin joukkoon, karsinogeenisten PAH-yhdisteiden aiheuttamat terveysriskit työvaiheessa ja materiaalin sisältämien muiden epäpuhtauksien minimointi. Nämä ovat lähinnä kierrätyslaitoksen ratkaistavissa olevia vastaanotettavan materiaalin valvontaan liittyviä kysymyksiä.





**Kuva 1. Huopakattojätettä varastoituna.**



**Kuva 2. Huopakattojätettä ensimmäisen rouhinnan jälkeen, käsi ja kortti mittakaavana.**



## **1.2 Tutkimusongelma**

Ulkomailla kattohuopajätteen hyödyntämistä tierakentamisessa on tutkittu jo kolmattakymmentä vuotta. Yhdysvaltalainen tutkimus vuodelta 1999 (Foo, Hanson & Lynn) totesi huopakatetta sisältävien kuumamassojen olevan täysin uusista materiaaleista koostuvien massojen kaltaisia, ja jo vuonna 1993 Grzybowski totesi kierrätetyn kattohuopajätteen soveltuvan kuumamassojen lisäaineeksi. Huopakateasfaltin todettiin olevan tosin elastisempaa ja kestävämpää kylmää huonommin. Yhdysvalloissa huopakateasfalttia on käytetty jo noin kymmenen vuoden ajan etenkin lämpimimmissä osavaltioissa.

Suomessa joudutaan ottamaan huomioon subtrooppista ilmalalaa huomattavasti kylmemmät sääolot ja näistä aiheutuvat erityisvaatimukset massan kylmäkestävyydelle. Lisäksi ulkomaisia tutkimustuloksia ei voida suoraan käyttää osoittamaan kierrätysmateriaalin käyttökelpoisuutta, koska varsinkin sideaineiden luokitusmenetelmät vaihtelevat maasta toiseen.

## **1.3 Tutkimuksen tavoite**

Diplomityön tavoite on tutkia kierrätetyn huopakateasfaltin käyttökelpoisuutta kotimaisissa oloissa ja sen ominaisuuksia paikallisten normien ja laatuvaatimusten kannalta.

## **1.4 Tutkimuksen rakenne**

Tutkimus koostuu kahdesta osasta: kirjallisuuskatsauksesta ja laboratoriotutkimuksista. Kirjallisuuskatsauksessa kartoitetaan kierrätetyn huopakateasfaltin tutkimusta ja sen nykytilaa. Laboratoriotutkimuksissa tutkitaan kierrätetyn huopakateasfaltin ominaisuuksia, joista voidaan tehdä päätelmiä sen käyttökelpoisuudesta etenkin kotimaisten laatuvaatimusten ja normien valossa.

## **1.5 Tutkimuksen rajaus**

Tähän tutkimukseen ei voida aikarajoitteiden takia sisällyttää kierrätetystä huopakatteesta valmistetun asfalttipäällysten in situ -kulutuskestävyydestä tutkimusta, joka olisi luultavasti mielenkiintoisin käytännön sovellusten kannalta. Laboratoriotutkimuksin voidaan kuitenkin selvittää riittävästi massan ominaisuuksia alustavan käyttökelpoisuusarvion tekemiseen.

## 2 Kirjallisuuskatsaus

Huopakattojätteen käyttöä asfalttipäällysteissä on tutkittu yli 20 vuotta. Kenneth F. Grzybowski tutki vuonna 1993 kierrätetyn kattuhuovan käyttöä kuumamassojen lisääneena. Tutkimuksessa valmistettiin kuumamassoja kolmesta eri kiviaineksesta käyttäen tavanomaisia sideaineita ja nollasta kymmeneen prosenttiin kattohuoparouhetta. Massojen toiminnallisia ominaisuuksia tutkittiin Marshall-menetelmällä, epäsuoralla halkaisuvetolaitteella ja pyöräkuormituslaitteella. Päätelmänä Grzybowski esitti, että kattohuopajätteen käyttäminen kuumamassojen lisääneena voi vähentää tuoreen sideaineen käyttöä ja lisää päällysteen muodonmuutosten vastustuskykyä korkeissa käyttölämpötiloissa. Erityisesti päällysteen urautuminen väheni kattohuopajätettä käytettäessä tavanomaisiin päällysteisiin verrattuna. Grzybowski totesi tulosten pätevän eri kiviaineksille ja suhteituksille. Kokeissa käytetyt lämpötilat olivat verrattavissa Floridan osavaltiossa vallitseviin päällysteen käyttöolosuhteisiin.

Newcomb et al. tutkivat kattohuopajätteen käyttöä perinteisissä ja SMA-massoissa vuonna 1993. Heidän tutkimuksensa tarkoituksena oli selvittää kattohuopajätteen vaikutuksia massojen toiminnallisiin ominaisuuksiin ja tuoreen sideaineen määrän vähentämismahdollisuuksia etenkin perinteisten massojen osalta. Perinteisiä massoja tutkittiin kahden sideaineen ja kolmen eri kattohuopamäärän osalta yhdellä rakeisuudella. Vertailun vuoksi sanottakoon perinteisten massojen kiviaineksen rakeisuus vastanneen lähes PANK ry:n asfalttinormien AB16-massan laatuvaatimuksia, lukuun ottamatta hienoineksen ja karkeimman aineksen alhaisia määriä. Samoin käytetyt sideaineet (85/100 ja 125/150) vastasivat näitä vaatimuksia niin tunkeumaluokituksestaan kuin määrältään. Massa tiivistettiin Marshall-vasaralla 75 iskulla molemmin puolin ja kaikki kolme perinteistä massaa tiivistyivät siten, että tyhjätila oli kullakin 4 %. Massojen jäykkyys tutkittiin 1 °C, 25 °C ja 50 °C lämpötiloissa ja epäsuora halkaisuvetolujuus -18 °C ja 25 °C lämpötiloissa. Tutkimus osoitti kattohuovan lisäämisen vähentävän massan jäykkyyttä, mutta toisaalta vähentävän jäykkyyden muutoksia lämpötilavaihteluiden seurauksena. Kattohuovan lisääminen massa kasvatti massan vetolujuutta. Erityisesti -18 °C lämpötilassa kattohuovan lisäämisen havaittiin aiheuttavan haurastumista. Perinteisten massojen toiminnallisten ominaisuuksien muutosten todettiin olevan kattohuovan sisältämän ylimääräisen sideaineen ja huopakuitujen aiheuttamia.

Vuonna 1999 Foo et al. tutkivat huopakatteen käyttöä kuumamassoissa. Tutkimuskohde oli huopakatteen kelpoisuus tuoreen bitumin ja kiviaineksen korvaajana. Tutkimuksessa käytettiin tuoreena sideaineena Ergon AC-20:ta, joka vastaa tunkeumaluokituksestaan  $\geq 40$  mm/10 -luokiteltua bitumia (esim 50/70 tai 70/100) (Doré & Zubeck, 2009, s. 271). Sideaineille – sekä tuoreelle että huopakaterouheesta uutetulle – tehtiin reologisia kokeita, joilla määritettiin niiden kompleksimoduuli  $G^*$  sekä vaihekulma  $\delta$ . Lisäksi kokeissa valmistettiin yhdeksän Marshall-suhteitettua massanäytettä eri huopakatepitoisuuksilla (0, 5, ja 10 %) ja kiviaineksen rakeisuuksilla. Huopakatteista uutetun sideaineen tunkeumaksi määritettiin keskimäärin 19 mm/10 ja tuoreen sideaineen tunkeumaksi 67 mm/10. Huopakatteesta uutetun sideaineen  $G^*/\sin \delta$  oli suhteellisen pieni, noin 100-300 kPa. Epäsuora vetolujuus näytteissä laski huopakatteen osuuden kasvaessa. Näytteiden muodonmuutoksen vastustuskyky kasvoi huopakatteen osuuden kasvaessa. Päätelmänä Foo et al. esittivät huopakatteen olevan kelvollinen lisäaine kuumamassoihin ja että huopakatteen lisääminen kuumamassoihin lisää massan jäykkyyttä ja urautumiskestävyyttä huomattavasti, joskin massojen väsyminen saattaa olla nopeampaa ja niiden kylmäkestävyys heikentynyttä. Pehmeämmän tuoreen sideaineen käyttöä suositeltiin

huopakatetta sisältävien massojen valmistuksessa edellä mainittujen heikkouksien poistamiseksi.

Hieman tuoreemmassa tutkimuksessa Nam et al. (2014) tutkivat purkujätteestä peräisin olevan huopakatteen käyttöä kuumamassoissa. Purkujätettä haluttiin tutkia sen sisältämän sideaineen huomattavan vanhenemisen takia. Vanhentunut sideaine on erittäin jäykkää ja Nam et al. halusivat selvittää millä huopakatepitoisuudella ja tuoreen sideaineen sekoitussuhteella saavutettaisiin massan optimaaliset lujuus- ja kestävyysominaisuudet. Lisäksi tutkimuksessa vertailtiin kahdesta eri osavaltioista (Florida ja Minnesota) peräisin olevia huopakate-eriä ja havaittiin että lämpimämmän ilmaston alueella huopakatteen sideaine on selvästi järempää ja tuottaa paremmat tulokset muodonmuutoksen vastustuskäyvyyssä. Maksimilujuuden kokeissa saavuttanut massa sisälsi 3,77 % tuoretta sideainetta ja 6 % kattohuoparouhetta. Tässä massassa sideaine ei kuitenkaan peittänyt kiviainesta riittävästi, joten tutkimuksen suositus oli käyttää noin 5 % huopakatemäärää ja 4,77 % sideainemäärää optimikestävyuden saavuttamiseksi. Huopakatetta sisältävän massan kylmäkestävyyden epäiltiin olevan huonompaa kuin tuoreesta sideaineesta valmistetun massan, mutta tätä ei Floridan olosuhteissa pidetty merkittävänä riskinä.

On huomionarvoista, että kaikki yllä esiteltyt tutkimukset ovat keskittyneet nimenomaan päällysteen kulutuskestävyyteen ja erityisesti uranmuodostumisen estävien ominaisuuksien tutkimiseen. Lisäksi kaikissa yllä esiteltyissä tutkimuksissa on arveltu kierrätettyä kattohuoparouhetta sisältävien massojen olevan kylmäkestävyydeltään heikkoja, mutta tätä ei varsinaisesti näissä tutkimuksissa tutkittu. Vuonna 2013 tehdyssä kanadalaisessa case-tutkimuksessa (Yang et al. 2013) todettiin kierrätetyn huopakatteen nostavan sideaineseoksen alinta käyttökelpoista lämpötilaa noin kolmella celsiusasteella seoksen tuoreen sideaineen alimpaan käyttölämpötilaan verrattuna. Kylmäkestävyysominaisuudet olivat tässä korkeammassa lämpötilassa vastaavat kuin tuoreen sideaineen alemassa lämpötilassa.

Kun kierrätettyä kattohuoparouhetta sisältävä asfalttimassa sekoitetaan, on tavoitteena saada kattohuoparouheen sisältämä sideaine sekoittumaan massan tuoreen sideaineen kanssa siten, että saadaan aikaiseksi ominaisuuksiltaan homogeeninen sideaineseos, joka antaa asfalttimassalle riittävät mekaaniset ominaisuudet toiminnallisten vaatimusten täyttämiseksi. Huopakattorouheen sisältämä sideaine on kuitenkin jo huopakatteen valmistusprosessissa vanhentunutta ja purkujätteestä peräisin olevan huopakatteen sisältämä sideaine vielä lisää vanhentunutta sääolojen vaikutuksella altistuttuaan. Onkin tärkeää, miten nämä kaksi sideainekomponenttia – huopakattorouheen sisältämä sideaine ja tuore sideaine – saadaan sekoittumaan riittävällä tavalla. Ennen vuotta 2015 tätä ei ollut juurikaan tutkittu, kuten Zhao et al. (2015) tutkimuksessaan toteavat. Zhao et al. tutkivat nimenomaan sideainekomponenttien sekoittumista ja tarkemmin niiden sekoittumisen tapaa. Tutkimuksen lähtökohtana pidettiin kolmea sekoittumistapaa mahdollisina: ensimmäisessä osa huopakattorouheen sisältämästä sideaineesta olisi niin vanhentunutta, että se jäisi ”mustaksi kiviainekseksi” massan joukkoon eikä toimisi sideaineena lainkaan; toisessa sekoittumistavassa sideainekomponentit sekoittuisivat homogeeniseksi massaksi, josta voitaisiin kuitenkin erottaa tuore ja vanhentunut sideaine ”rakeina (granules)”; kolmannessa sekoittumistavassa molemmat sideainekomponentit yhdistyisivät täysin homogeeniseksi ”uudeksi” sideaineeksi. Tutkimuksessa havaittiin, että yhdistyminen uudeksi täysin homogeeniseksi sideaineeksi sekoitusprosessissa on erittäin epätodennäköistä ja että luultavin sekoittumistapa on toinen esitetyistä, toisin sanoen homogeeninen seos, josta voidaan erottaa tuoreen ja vanhentuneen sideainekomponentin ”rakeita”. Tutkimuksen esitutkimuksessa (Zhao et al., 2014) havaittiin että

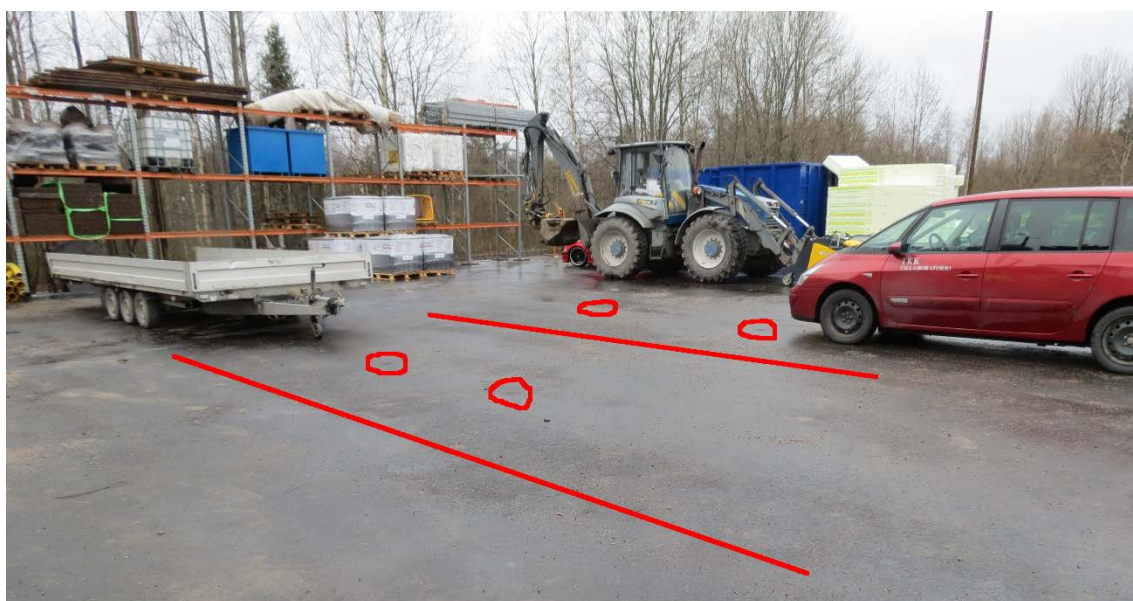
tärkein sideainekomponenttien sekoittumiseen vaikuttava tekijä on sekoitusaika, kun taas sekoituslämpötilan vaihtelulla (150-190 °C) ei ollut merkittävää vaikutusta sideainekomponenttien sekoittumiseen. Lisäksi havaittiin noin 5 % huopakattorouhepitoisuuden oleva optimaalinen sideainekomponenttien sekoittumiselle.

### 3 Laboratoriossa tutkittavat näytteet ja tutkimusmenetelmät

#### 3.1 Tutkittavat näytteet

##### 3.1.1 Poranäytteet huopakateasfalttimassasta

Tarpaper Recycling Finland Oy toimitti viisi poranäytettä Lahdessa sijaitsevan teollisuuskiinteistön pihalle 3.12.2014 levitetystä päällysteestä, joka sisälsi huopakatto-rouhetta. Poranäytteet numeroitiin laboratoriossa tunnuksilla 1-5 ennen kokeiden aloittamista. Näytteenottopaikkoja ja näytteitä ei voitu yhdistää toisiinsa, joten tekijän käytössä näytteenottopaikalla 17.4.2015 ei tekijä voinut varmasti sanoa onko näytteenottopaikkoja ympäröivän massan ulkoisella olemuksella ja näytteiden koetuloksilla selvää yhteyttä. Näytteet oli kuitenkin porattu kolmesta eri levitysraidasta, kaksi yhdestä, kaksi toisesta ja yksi kolmannesta. Levitysraitojen ulkoinen olemus viittasi eroavaisuuksiin päällysteen tiivistyksessä ja mahdollisessa lajittuneisuudessa. Kuvaan 3 on ympyröity neljä näytteenottopaikkaa ja levitysraitojen rajat. Viides näytteenottopaikka on auton takana kolmannella levitysraidalla.



Kuva 3. Poranäytteiden ottopaikat ja päällysteen levitysraidat.

Massa oli Tarpaper Recycling Finland Oy:n mukaan sekoitettu taulukon 1 mukaisilla suhteilla AB16-massana. Ari Mikkonen Asfalttikallio Oy:stä ilmoitti sähköpostikirjeenvaihdossa massan sekoituslämpötilan olleen 190 °C, levityslämpötilan noin 170 °C ja levitetyn laatan paksuuden noin 5 cm.

**Taulukko 1. Poranäytteiden massan ilmoitettu koostumus**

	massa-%
KaM 0-16	94
B 160/220	4
Kattohuopa	2

### 3.1.2 Huopakattorouhe

Tarpaper Recycling Finland Oy toimitti yhden näytepussin BitumenMix 8 -tuotetta, joka on kierrätetystä huopakatteesta valmistettua rouhetta, jonka pitäisi sisältää puolet purkujätteestä peräisin olevaa rouhetta ja puolet huopakatteen valmistuksen ylijäämäpalloista valmistettua rouhetta. Näytepussin sisällössä erottui paljaalla silmällä jonkin verran muutakin purkujätettä kuin bitumista kattorouhua ja kiviainesta.

Tanskalainen Eurofins Product Testing AS on analysoinut vastaavaa rouhetta vuonna 2013 ja ilmoittaa raportissaan taulukossa 2 esitetyn koostumuksen rouheelle.

**Taulukko 2. Huopakattorouheen koostumus (Eurofins Product Testing AS, 2013)**

	massa-%
Sideaine	68
Vesipitoisuus	4
Kalkkifilleri	5
Kiviaines	14
Muu materiaali*	9

\*Laskennallinen, sisältää paperia, lautta, kumia.

### 3.1.3 Huopakattorouheesta laboratoriossa valmistetut koekappaleet

Alkuperäisille poranäytteille tehtyjen tutkimusten jälkeen poranäytteiden kiviaineksesta valmistettiin koekappaleita kiertotiivistysmenetelmällä. Tiivistysmenetelmän valintaan vaikutti halu tutkia huopakattorouhetta sisältävän asfalttimassan ominaisuuksia pienen tyhjätilan alueella. Alkuperäiset poranäytteet sisälsivät suhteellisen paljon tyhjätilaa, kuten luvusta 4.1 käy ilmi ja AB16-massan tavoitetyhjätila-alueen 1-4 % tutkiminen tuntui aiheelliselta.

Massan teossa käytettiin taulukon 1 mukaisia sekoitussuhteita. Käytetty huopakattorouhe oli peräisin luvussa 3.1.2 esitellyistä näytepussista. Massan tekoon käytettyjen aineiden massat on esitelty taulukossa 3. Massan vähäisen määrän vuoksi massa sekoitettiin sekoitusastiassa käsityökalulla asfaltinsekoittimen sijaan. Kiviaines, sekoitusastia ja sekoitustyökalu lämmitettiin 150 °C lämpötilaan ja bitumi 160/220 lämpötilaan 145 °C ennen sekoitusta. Lämpötilat valittiin PANK-normien mukaisen 70/100-sideaineen sekoituslämpötilan mukaan. Kiviaines punnittiin sekoitusastiassa ja siihen sekoitettiin huoneenlämpöinen huopakattorouhe. Bitumi kaadettiin sekoitusastiaan ja massaa sekoitettiin, kunnes se vaikutti homogeeniselta. Sekoituksen aikana ja sen jälkeen massaa pidettiin uunissa 150 °C lämpötilan säilyttämiseksi. Sekoitus kesti noin viisi minuuttia.

**Taulukko 3. Laboratoriomassan ainesosien massamäärät ja suhteelliset osuudet.**

aines	massa, g	%
kiviaines	3475,6	94,3
bitumi 160/220	140,4	3,8
BitumenMix8	69,6	1,9
yhteensä	3685,6	100,0

Massa tiivistettiin kahdessa noin 1800 g erässä käyttäen ICT-150RB -kiertotiivistintä. Tiivistyksessä käytettiin 600 kPa painetta, 22 mrad kiertokulmaa ja 26,9 kierroksen minuuttitahtia. Tiivistyskiertoja tehtiin 100 molemmille kappaleille. Kappaleiden halkaisija oli 100 mm. Tiivistetyt kappaleet sahattiin kahtia; koekappaleita valmistettiin siis

yhteensä neljä. Tiivistystä ei voitu tehdä joka kappaleelle erikseen, koska tiivistettävä massamäärä olisi ollut liian pieni käytetyllä laitteella tiivistettäväksi.

Näytteet numeroitiin tunnuksilla 6-9 siten, että näytteet 6 ja 7 ovat ensimmäisestä tiivistuskappaleesta ja näytteet 8 ja 9 vastaavasti toisesta sahattuina. Näytteet 8 ja 9 yritettiin tehdä ensin yksittäin, mutta pienen massamäärän vuoksi ne jouduttiin murskaamaan ja lämmittämään uudelleen yhdistettyä tiivistystä varten. Tämän vuoksi pidettiin mahdollisena, että näytteiden 8 ja 9 tutkimustulokset voisivat poiketa näytteiden 6 ja 7 tuloksista ylimääräisen vanhenemisen takia. Taulukossa 4 on esitetty kiertotiivistimen mittaamat kappalekorkeudet ja -tiheydet sekä tiivistetty massamäärä.

**Taulukko 4. Kiertotiivistimen ilmoittama kappalekorkeus ja -tiheys.**

kappale	massa, g	korkeus, mm	tiheys, kg/m <sup>3</sup>
6+7	1801	96,4	2380
8+9	1821	95,9	2418

Kiertotiivistimen mittaaman kappaleitiheyden ja alkuperäisistä poranäytteiden maksimitiheyden perusteella arvioitiin näytteiden 6+7 tyhjätilaksi noin 3,7 % ja näytteiden 8+9 tyhjätilaksi noin 2,1 %. Arvio perustuu oletukseen, jossa massan maksimitiheys on sama kuin poranäytteissä. Koska poranäytteissä olleen huopakattorouheen kiintoaines oli kiviaineksen joukossa, voivat mitatut tyhjätilat poiketa arviosta hieman.

## 3.2 Tutkimusmenetelmät

### 3.2.1 Asfalttimassatutkimukset

Asfalttimassalle tehtiin seuraavat tutkimukset:

- Koekappaleiden ulkomittojen määrittäminen
- Kappaleitiheyden määrittäminen
- Massan jäykkyyden määrittäminen
- Massan halkaisuvetolujuuden määrittäminen
- Massan maksimitiheyden määrittäminen
- Massan tyhjätilan määrittäminen
- Massan sideainepitoisuuden määrittäminen

Koekappaleiden ulkomitat määritettiin standardin SFS-EN 12697-29 mukaisesti työntömitalla. Koekappaleen paksuus mitattiin neljästä kohdasta kappaleen ulkokehältä ja mittausten keskiarvoa pidetään kappaleen paksuutena. Kappaleen halkaisija mitattiin kahdesta toisistaan vastaan kohtisuoraan olevilta akseleilta siten, että kummaltakin akselilta mitattiin kolme kertaa: yläreunasta, keskeltä ja alareunasta. Kappaleen halkaisijana pidetään mittojen keskiarvoa.

Kappaleitiheyden määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12697-6 menetelmän A (kuivamenetelmä) mukaisesti. Koekappaleet punnittiin ensin kuivana ilmassa ja sen jälkeen vedessä. Kappaleen vedessä punnittu massa on vaa'an lukema välittömästi veden asettumisen jälkeen, veden imeytymistä näytteeseen ei odotettu. Veden lämpötilan perusteella määritettiin veden tiheys ja mitattujen massojen ja veden tiheyden perusteella laskettiin koekappaleiden tiheys.

Massan jäykkyyden määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12697-26 mukaisesti 10 °C lämpötilassa. Kokeissa käytettiin UTM-25 -laitetta, jolla kappaleita kuormitettiin pysty-



akselia puristavalla voimalla pulsseissa. Kappaleen muodonmuutos vaaka-akselilla mitattiin. Koe toistettiin samalla kappaleella, kun kappaletta oli kierretty 90 astetta. Mittausten tuloksena saatavien jäykkyysarvojen keskiarvoa käytetään kappaleen jäykkyytenä. Standardin mukaan hyväksyttävä tulos saadaan, kun ensimmäisen ja toisen mittauksen tulosten välinen suhteellinen ero on  $-10 - +20 \%$ . Koko massan jäykkyytenä käytetään yksittäisten kappaleiden jäykkyysarvojen keskiarvoa.

Massan halkaisuvetolujuuden määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12697-23 mukaisesti  $10\text{ °C}$  lämpötilassa. Tässä kokeessa käytettiin UTM-25 -testilaitetta, jolla kappaletta puristettiin pystyakselin suuntaisesti, kunnes se halkesi. Puristus tapahtui vakionopeudella ja laite mittasi nopeuden saavuttamiseksi tarvittavaa voimaa. Koetuloksena saatiin käytetyn voiman maksimi. Maksimivoiman ja koekappaleen mittojen avulla voitiin laskea kappaleen epäsuora halkaisuvetolujuus. Massan halkaisuvetolujuuden arvo on koekappaleiden laskennallisten lujuuksien keskiarvo.

Massan maksimitiheys määritettiin standardin SFS-EN 12697-5 mukaisesti hydrostaattisella menetelmällä. Koekappaletta lämmitettiin  $110\pm5\text{ °C}$  lämpötilassa sen kuivamiseksi ja pehmentämiseksi. Lämmin kappale murennettiin siten, että yksittäiset suuremmat rakeet ja alle 6 mm kokoiset hienoainesaglomeraatit erottuivat. Näyte punnittiin ilmassa ja upotettiin astiassa vesihauteeseen. Näyte ja astia altistettiin tärinälle ja alipaineelle näytteessä olevan ilman poistamiseksi. Näyte ja astia asetettiin tämän jälkeen temperoitumaan vesihauteeseen ja punnittiin saman lämpöisessä vedessä. Veden lämpötilan avulla laskettiin veden tiheys. Näytteen massan ilmassa ja vedessä sekä veden tiheyden avulla voitiin laskea murskatun näytteen tiheys, joka on koekappaleen maksimitiheys.

Massan sisältämän tyhjätilan osuus määritettiin standardin SFS-EN 12697-8 mukaisesti kappaleitiheyden ja kappaleen maksimitiheyden avulla. Tuloksena saatiin tyhjätilan suhteellinen osuus koekappaleen tilavuudesta.

Massan sideainepitoisuus määritettiin uuttosuodatuksella metyleenikloridilla ja punnitsemalla näyte ennen seulontaa ja liukenematon aines pesuseulonnan jälkeen. Massojen erotus on yhtä suuri kuin uutetun sideaineen massa ja sideainepitoisuus puolestaan sideaineen massan suhde alkuperäisen näytteen massa. Sideaine jäi metyleenikloridiliuokseen, josta se erotettiin tislamalla metyleenikloridi pois näytteestä. Uuttosuodatuksessa käytettiin Strassentest OHG:n valmistamaa automaattista uuttosuodatuslaitteistoa, jolle ei ole määritelty erillistä standardia mittauksille.

### **3.2.2 Tutkimukset huopakattorouheelle**

Huopakattorouheesta tutkittiin sideainepitoisuus uuttosuodatuksella edellä kuvatulla menetelmällä. Tutkimuksessa rouheesta erotettiin kiviaines ja sideaine, joille tehtiin edempänä esitetyt tutkimukset.

### **3.2.3 Kiviainestutkimukset**

Uuttosuodatuksessa sideaineesta puhdistetun kiviaineksen rakeisuus määritettiin seulonnalla. Seulonnassa käytettiin seuraavia seuloja:

- 20 mm
- 16 mm
- 11,2 mm
- 8 mm
- 5,6 mm

- 4 mm
- 2 mm
- 1 mm
- 0,5 mm
- 0,25 mm
- 0,125 mm
- 0,063 mm

Kiviaines kaadettiin seulasarjaan ja seulasarjaa tärisytettiin viidentoista minuutin ajan. Kullekin seulalle jäänyt kiviaines punnittiin ja kunkin seulan läpäisseen kiviaineksen osuus laskettiin. Tuloksena on kiviaineksen rakeisuuskäyrä.

### 3.2.4 Sideainetutkimukset

Sideaineelle tehtiin seuraavat tutkimukset:

- Tunkeuma-arvon määrittäminen penetrometrillä
- Pehmenemispiste rengas-kuula -menetelmällä
- Taajuuspyyhkäisy reometrillä
- Amplitudipyhkyisy reometrillä
- MSCR-virumapalautumakoe reometrillä
- Fraass-murtumispisteen määrittäminen

Sideaineen tunkeuma-arvo määritettiin standardin SFS-EN 1426 mukaisesti. Sideainenäyte temperoitiin 25 °C lämpötilaan ja asetettiin penetrometrin alle 25 °C lämpöiseen vesihauteeseen. Penetrometrin neula asetettiin näytteen pinnalle ja neula vapautettiin viiden sekunnin ajaksi. Penetrometristä luettiin neulan tunkeumasyyvyys millimetrimin kymmenyksinä. Koe toistettiin kolme kertaa samalle näytteelle ja näytteen tunkeuma-arvo on näiden mittausten keskiarvo, mikäli tulokset eivät poikkea toisistaan kahta millimetrimin kymmenystä alle 50 mm\*10<sup>-1</sup> tunkeumilla tai neljää millimetrimin kymmenystä 50-149 mm\*10<sup>-1</sup> tunkeumilla.

Sideaineen pehmenemispiste määritettiin standardin SFS-EN 1427 mukaisesti. Sideaine lämmitettiin 90 °C oletettua pehmenemispistettä korkeampaan lämpötilaan ja kaadettiin samaan lämpötilaan temperoituihin kahteen renkaaseen siten, että sideainetta oli renkaassa hieman enemmän kuin siihen mahtuu. Näytteiden ja renkaiden annettiin jäähtyä 30 min, minkä jälkeen näytteet leikattiin renkaiden yläreunan tasalle. Koejärjestelyssä käytettiin telineitä, joihin renkaat näytteineen asetettiin. Näytteet, renkaat, telineet ja teräskuulat temperoitiin +5 °C lämpötilaan vesihauteessa. Teräskuulat asetettiin renkaiden päälle keskitinrenkaiden avulla ja vesihauteen lämpötilaa alettiin nostaa tasaisesti 5 °C/min. Bitumin lämmitessä kuula alkoi venyttää sitä. Kun kuula ja bitumi osuivat telineessä renkaiden alla olevaan levyyn, merkittiin vesihauteen silloinen lämpötila muihin pehmenemispisteinä. Telineessä oli kerrallaan kaksi näytettä samasta sideainerästä. Mikäli näytteiden pehmenemispisteet ovat alle 80 °C, saavat mittaustulokset erota toisistaan 1 °C. 80 °C suuremmilla pehmenemispisteillä koe tulee suorittaa glyserolihauteessa; tällöin sallittu erotus näytteiden pehmenemispisteiden välillä on 2 °C.

Taajuuspyyhkäisy tutkimuksessa sideainenäytettä oskilloitiin reometrissä eri taajuuksilla leikkausmuodonmuutoksen pysyessä vakiona. Käytettävät taajuudet olivat 0,01-10 Hz. Koe toistettiin eri lämpötiloissa välillä +0 - +90 °C. Lämpötila-alueella +0 - +40 °C käytettiin halkaisijaltaan 8 mm levy-levy -geometriaa ja lämpötila-alueella +40 - +90 °C

halkaisijaltaan 25 mm levy-levy -geometriaa. Leikkausmuodonmuutos oli alemmalla lämpötila-alueella 0,05 % ja korkeammalla lämpötila-alueella 1 %. Reometri mittasi muodonmuutoksen aikaansaamiseksi vaadittavaa leikkausvoimaa  $\tau$ , josta voitiin laskea sideaineen jäykkyys eli kompleksimoduuli  $G^*$ . Lisäksi reometri mittasi sideaineen vaihekulmaa  $\delta$ . Näiden ominaisuuksien avulla voidaan arvioida sideaineen viskoelastista käytöstä eri kuormituksilla eri lämpötiloissa. Menetelmässä käytettävä leikkausmuodonmuutos oli suhteellisen pieni, joten mittausten aikana sideaineen käytös pysyi lineaarisen viskoelastisuuden alueella, jossa kompleksimoduulin  $G^*$  reaali- ja imaginääri-komponentit pysyvät lähes vakioina.

Amplitudipyyhkäisytestimuksesta sideainenäytettä oskilloitiin reometrissä kasvavilla amplitudeilla taajuuden pysyessä vakiona 10 Hz:ssä. Reometri mittasi sideaineen kompleksimoduulia  $G^*$  ja vaihekulmaa  $\delta$  sekä aiheutetun muodonmuutoksen aikaansaamiseksi tarvittua leikkausjännitystä. Laskennan jälkeen saatiin tulokseksi parametrit  $A$  ja  $B$ , joiden avulla voidaan laskea sideaineen väsymistä kuvaava parametri  $N_f$  sekä 2,5 % että 5 % leikkausmuodonmuutoksille  $\gamma$  kaavan 1 avulla.

$$N_f = A(\gamma)^{-B} \quad (1)$$

AASHTO:n standardissa TP-101 väsymisparametriä  $N_f$  käytetään ”heikon” eli alle neljän tuuman paksuiseen ( $\gamma = 5$  %) ja ”vahvan” eli yli neljän tuuman paksuiseen ( $\gamma = 2,5$  %) päällysteeseen käytettävän sideaineen laatuvaatimuksena. Testilämpötila oli 10 °C.

MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) -virumapalautumakokeessa sideainetta kuormitettiin yhden sekunnin ajan määrätyillä leikkausjännityksillä ja annettiin palautua yhdeksän sekunnin ajaen ennen seuraavaa kuormitusta AASHTO:n standardin TP-70 mukaisesti. Ensimmäiset kymmenen kuormitusta tehtiin 100 Pa jännityksellä, seuraavat kymmenen 3200 Pa jännityksellä ja viimeiset kymmenen 6400 Pa jännityksellä. Kustakin kuormituskerrasta mitataan maksimileikkausmuodonmuutos kuormituksen lopussa ja muodonmuutoksen palautuma yhdeksän sekunnin palautumisen jälkeen. Tuloksena saadaan palautumaton virumismyötääminen  $J_{nr}$  eli palautumattoman leikkausmuodonmuutoksen suhde leikkausjännitykseen, jolla kuormitus tehtiin, sekä muodonmuutoksen keskimääräinen palautumaprosentti  $R$  kullakin jännitystasolla. Nämä suureet kuvaavat sideaineen deformaatiokestävyyttä eli kykyä palautua kuormituksen jälkeen. Koe tehtiin lämpötilassa 50 °C.

Fraass-murtumispisteen määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12593 mukaisesti. Ohuille metallilevyille levitettiin sideainetta kalvo ja metallilevyä taivutettiin 1 °C välein laskevassa lämpötilassa. Lämpötila, jossa sideainekalvo murtui venymisen sijasta, on sideaineen Fraass-murtumispiste. Fraass-murtumispiste kuvaa sideaineen haurautta alhaisissa lämpötiloissa.

## 4 Tutkimustulokset

### 4.1 Asfalttimassatutkimukset

Tarpaper Recycling Finland Oy:n toimittamat poranäytteet numeroitiin koekappaleiden tunnuksilla 1-5. Laboratoriossa valmistetut koekappaleet numeroitiin tunnuksilla 6-9.

Koekappaleiden ulkomitat on esitetty taulukossa 5, jossa h on kappaleen korkeus ja d kappaleen halkaisija. Taulukkoon on lisäksi laskettu mittojen perusteella kunkin kappaleen tilavuus V.

**Taulukko 5. Koekappaleiden ulkomitat ja laskettu tilavuus**

näyte	h (mm)	d (mm)	V (cm <sup>3</sup> )
1	41,4	96,9	305
2	48,6	96,9	358
3	45	96,9	332
4	39,6	96,5	290
5	52,1	95,4	372
6	44,6	99,9	350
7	47	99,9	368
8	45,1	99,9	354
9	46	99,9	361

Taulukossa 6 on esitetty koekappaleiden kappaleitiheydet. Veden lämpötila  $T_w$  oli 19,5 °C näytteille 1-5 ja 21,3 °C näytteille 6-9. Veden tiheys  $\rho_w$  oli 0,99838 g/cm<sup>3</sup> näytteille 1-5 ja 0,99799 g/cm<sup>3</sup> näytteille 6-9. Veden tiheys on laskettu kaavan 2 esittämällä tavalla.

$$\rho_w = 1,000\,252\,05 + \left( \frac{7,59 \cdot T_w - 5,32 \cdot T_w^2}{10^6} \right) \quad (2)$$

Taulukossa  $m_1$  on koekappaleen massa ilmassa punnittuna ja  $m_2$  koekappaleen massa vedessä punnittuna.  $\rho_b$  on laskettu kappaleitiheys kullekin näytteelle, kaavan 3 mukaisesti.

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_1 - m_2} * \rho_w \quad (3)$$

Vesipunnituksen aikana näytteestä 3 havaittiin nousevan ilmakuplia, joten standardin SFS-EN 12697-6 vesikyllästysmenetelmä B olisi soveltunut paremmin kuivamenetelmän A sijaan näiden koekappaleiden kappaleitiheyden määrittämiseen. Ilmakuplat vesihuuteessa kertovat näytteen suuresta tyhjiätilasta tai huokoisuudesta.

**Taulukko 6. Koekappaleiden kappaleitiheydet**

	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\rho_b$ (Mg/m <sup>3</sup> )
1	657,7	362,4	2,224
2	813,6	460,4	2,300
3	719,1	398,3	2,238
4	649,1	365,8	2,287
5	846,2	480,5	2,310
yhteensä	3685,7	keskimäärin	2,272
6	830,5	483,2	2,386
7	878,7	514,8	2,410
8	855,8	505,7	2,440
9	872,3	516,6	2,447
yhteensä	3437,3	keskimäärin	2,421

Taulukossa 7 on esitetty koekappaleiden jäykkyysmittausten tulokset. Pystysarake kuvaa ensimmäistä kappaleelle tehtyä mittausta ja Vaaka-sarake toista mittausta, jossa kappaletta on kierretty 90 °. Kullekin näytteelle on laskettu jäykkyysarvo kahden mittauksen keskiarvona ja näiden perusteella massan keskimääräinen jäykkyys. Lisäksi on laskettu ensimmäisen ja toisen mittaustuloksen suhteellinen erotus kullekin kappaleelle.

Kappaleiden 1-5 ensimmäinen ja toinen mittaus erosivat toisistaan yli standardin määrittelemän maksimierotuksen verran jokaiselle kappaleelle. Massa ei siis ehtinyt palautua ensimmäisen mittauksen kuormituksesta tarpeeksi ennen toista kuormituskertaa. Kokeessa käytettiin tavanomaista kuormitusohjelmaa, jotta tuloksia voidaan verrata aiempiin tutkimuksiin. Standardin hyväksymien tulosten saamiseksi olisi täytynyt käyttää pienempää kuormitusta, mutta tällöin tulosten vertailukelpoisuus ei olisi säilynyt. Kappaleiden 6-9 ensimmäisen ja toisen mittauksen välinen erotus oli standardin sallimissa rajoissa kaikille koekappaleille.

**Taulukko 7. Jäykkyyskokeiden tulokset**

näyte	Pysty (MPa)	Vaaka (MPa)	KA (MPa)	%-ero
1	2182	1718	1950	-21,3
2	3855	2973	3414	-22,9
3	2593	1989	2291	-23,3
4	3130	2161	2645,5	-31,0
5	4020	2514	3267	-37,5
		Keskimäärin	2714	
6	9480	7944	8712	-16,2
7	9442	8240	8841	-12,7
8	10069	9544	9806,5	-5,2
9	8728	8628	8678	-1,2
		Keskimäärin	9009	

Koekappaleiden epäsuoran vetolujuuskokeen tulokset on esitetty taulukossa 8. Taulukossa P on maksimikuormitus ennen kappaleen halkeamista, h kappaleen korkeus, d kappaleen halkaisija ja TSI epäsuora vetolujuus, joka on laskettu kaavalla 4. Tauluk-

koon on lisäksi laskettu kappaleiden epäsuorien vetolujuuksien keskiarvo, joka kuvaa massan vetolujuutta.

$$TSI = \frac{2P}{\pi dh} \quad (4)$$

Kuormitus tapahtui kappaleiden halkaisijan suuntaisesti. Kappaleen 8 halkaisu ei onnistunut UTM-25 -laitteen maksimikuormitusvoimalla 25 kN.

**Taulukko 8. Vetolujuuskokeiden tulokset**

näyte	P (kN)	h (mm)	d (mm)	TSI (kPa)
1	6,789	41,4	96,9	1077
2	10,702	48,6	96,9	1447
3	7,536	45	96,9	1100
4	8,357	39,6	96,5	1392
5	11,593	52,1	95,4	1485
Keskimäärin				1300
näyte	P (kN)	h (mm)	d (mm)	TSI (kPa)
6	21,255	44,6	99,9	3037
7	23,45	47	99,9	3180
8	-	45,1	99,9	-
9	22,999	46	99,9	3186
Keskimäärin				3134

Kappaleiden maksimitiheysmäärittelyn tulokset on esitetty taulukossa 9. Astian massa ilmassa ja vedessä on vastaavasti  $m_1$  ja  $m_2$  ja astian ja näytteen massa ilmassa ja vedessä vastaavasti  $m_3$  ja  $m_4$ . Maksimitiheys  $\rho_m$  on laskettu kaavan 5 mukaisesti massojen ja veden tiheyden  $\rho_w$  (kaava 1) perusteella.

Taulukossa 10 on esitetty kaavan 5 avulla kappaleitiheyden  $\rho_b$  ja maksimitiheyden  $\rho_m$  perusteella lasketut tyhjätilat TT koekappaleille 1-5 sekä 6 ja 8 kaavan 6 mukaisesti. Lisäksi koekappaleille 1-5 on laskettu kiviaineksen tyhjätila VMA ja kiviaineksen tyhjätilan täyttöaste VFB. Koekappaleiden 6 ja 8 sideainepitoisuutta ei ehditty laboratorion perusparannuksen takia tehdä, joten niiltä puuttuvat nämä määrittelyt. Käytetty kiviaines on kuitenkin samaa kuin kappaleissa 1-5, joten kiviaineksen tyhjätilan pitäisi olla kappaleita 1-5 vastaava. Maksimitiheyden määrittämistä varten näytteitä murennettaessa etenkin kappaleissa 1-5 havaittiin selvästi kattohuovan paloja ja kumimaista ainetta. Laboratorion perusparannuksen aiheuttaman aikapulan vuoksi päätettiin maksimitiheys määrittää vain kappaleista 6 ja 8, jolloin kummastakin kiertotiivistimellä valmistetusta koekappaleparista saatiin edustava näyte.

$$\rho_m = \frac{m_3 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} * \rho_w \quad (5)$$

$$TT = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100 \% \quad (6)$$

**Taulukko 9. Maksimitiheyskokeiden tulokset**

näyte	veden lämpötila $T_w$	veden tiheys $\rho_w$	astia		astia+näyte		maksimi- tiheys $\rho_m$ (Mg/m <sup>3</sup> )
			ilmassa $m_1$ (g)	vedessä $m_2$ (g)	ilmassa $m_3$ (g)	vedessä $m_4$ (g)	
1	19,55	0,99837	437,1	381,9	1094,5	773,6	2,470
2	19,55	0,99837	435,7	380,4	1247,3	863,5	2,467
3	19,76	0,99832	437,1	381,9	1154,9	810,1	2,474
4	19,76	0,99832	435,7	380,4	1085,3	767,1	2,467
5	19,71	0,99833	435,6	380,3	1281,6	883,8	2,466
Keskimäärin							2,469
6	21,1	0,99804	437,1	381,9	1266,7	877,1	2,476
8	21,1	0,99804	435,7	380,5	1290,6	889,4	2,466
Keskimäärin							2,471

**Taulukko 10. Tyhjätila koekappaleissa**

kappale	$\rho_b$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_m$ (Mg/m <sup>3</sup> )	TT (%)	VMA (%)	VFB (%)
1	2,224	2,470	9,96	21,3	53,2
2	2,300	2,467	6,77	18,7	63,8
3	2,238	2,474	9,54	20,7	53,9
4	2,287	2,467	7,30	19,0	61,5
5	2,310	2,466	6,33	18,8	66,4
6	2,386	2,476	3,63	-	-
8	2,440	2,466	1,05	-	-

Uuttosuodatuksella määritetyt sideainepitoisuudet kullekin koekappaleelle 1-5 on esitetty taulukossa 11. Lisäksi massan keskimääräinen sideainepitoisuus on laskettu näytteen tyhjätilojen keskiarvona. Koekappaleiden 6-9 sideainepitoisuuksia ei määritetty laboratorion perusparannuksen aiheuttamien aikataulupaineiden takia.

**Taulukko 11. Koekappaleiden sideainepitoisuus**

näyte	SA-pitoisuus, massa-%
1	5,1
2	5,2
3	5
4	5,1
5	5,4
keskimäärin	5,16

## 4.2 Tutkimukset huopakattorouheelle

Huopakattorouheen sideainepitoisuus määritettiin uuttosuodatusmenetelmällä. Taulukossa 12 on esitetty uuttosuodatuksessa erotettujen aineiden massat ja sideainepitoisuus. Seulasarjaan jäi karkeampia huopakappaleita ja muuta ainesta, joista sideaine ei ollut liennut täysin pois. Lisäksi seulasarjaan kiinnittyi yhteensä 0,8 g sideainetta. Liuenneen sideaineen osuus alkuperäisen näytteen massasta oli 53,6 %. Tämä ei vastaa rouheen kokonaissideainepitoisuutta uuttosuodatuksessa liukenemattoman sideaineen takia,



joten on mahdollista että rouheen kokonaissideainepitoisuus on lähellä Eurofins Product Testing AS:n (2013) vastaavalle tuotteelle määrittämää 68 % sideainepitoisuutta.

**Taulukko 12. Huopakattorouheen sideainepitoisuus ja uuttosuodatuksen fraktiot**

näyte	näytteen massa, g	liukenematon yhteensä, g	liennut sideaine, g	liunneen side- aineen osuus, massa-%
Bitumen Mix 8	200	92,8	107,2	53,6

Bitumen Mix 8 -rouheen kiintoaineksen seulonta päätettiin jättää tekemättä karkeaan kuitumateriaaliin kiinnittyneen sideaineen takia; sideaine olisi pilannut seulasarjan. Lisäksi kiviaineksen osuus rouheesta ja toisaalta rouheen osuus (2 %) asfalttimassassa oli niin pieni, ettei tämän hienon kiviaineksen tarkalla rakeisuudella olisi käytännön merkitystä massan suhteituksen kannalta.

Uuttosuodatuksen jälkeen metyleenikloridi tislattiin pois bitumiliuoksesta. Kun puhdasta sideainetta alettiin kaataa ulos pullosta, huomattiin sen olevan erittäin jäykkää. Pulloa jouduttiin lämmittämään poikkeuksellisen pitkään tunkeumakupin täyttämiseksi ja lopun sideaineen valuttamiseksi ulos pullosta. Pitkä lämmitysaika saattoi vanhentaa sideainetta enemmän kuin olisi toivottavaa. Sideaine vaikutti kumimaisemmalta kuin tuore bitumi tyypillisesti.

### 4.3 Kiviainestutkimukset

Koekappaleiden 1-5 kiintoaineksen rakeisuudet on esitetty seulojen läpäisyprosentteina taulukossa 13. Näytteiden rakeisuudet olivat samankaltaisia keskenään lukuun ottamatta näytteen 4 20 mm seulalle jäänyttä kiviainesta ja suhteellisesti pienempää 0,5-8 mm rakeiden osuutta. Kaikkien näytteiden kiviaines noudatti PANK-normien AB16-massan ohjerakeisuutta. Hieman kohonnut alle 8 mm raekoon pitoisuus selittyy halkaisuvetoisuuden tutkimuksessa haljenneilla kivillä ja toisaalta pienissä määrin kattuhuovan sisältämän hienon kiviaineksen läsnäololla.

Kaikissa näytteissä havaittiin kattuhuovan kuitumateriaalia. Näytteissä oli myös muovin paloja ja pala jonkinlaista kumia. Kuvassa 4 on huopakuitua, kuvassa 5 kumipala.

Koekappaleiden 6-9 kiviaineksen rakeisuutta ei määritetty laboratorion perusparannuksen aiheuttamien aikataulupaineiden takia. Toisaalta näihin kappaleisiin käytetty kiviaines oli kokonaan peräisin koekappaleista 1-5, joten se voidaan olettaa hyvin samankaltaiseksi. Kiviaineksen yhdistetty laskennallinen rakeisuus on esitetty taulukon 13 oikeanpuoleisimmassa sarakkeessa ”keskimäärin”.

**Taulukko 13. Koekappaleiden 1-5 rakeisuudet.**

seulakoko, mm	läpäisy-%					keskimäärin
	näyte 1	näyte 2	näyte 3	näyte 4	näyte 5	
20	100,0	100,0	100,0	98,4	100,0	99,7
16	99,0	97,5	95,8	95,4	97,7	97,2
11,2	84,6	86,1	81,1	81,2	85,6	82,6
8	71,7	73,6	70,6	65,4	69,5	70,4
5,6	62,2	64,1	61,8	57,0	61,1	61,5
4	55,3	54,8	54,1	50,4	55,0	54,1
2	43,3	42,7	43,0	39,5	42,5	42,4
1	32,1	31,8	32,3	29,6	31,8	31,4
0,5	23,5	23,2	23,6	22,7	23,7	23,3
0,25	17,0	16,8	17,2	17,6	17,7	17,2
0,125	11,9	11,5	11,8	12,7	12,8	12,1
0,063	8,6	8,3	8,6	9,3	9,8	8,9

**Kuva 4. Keltaista huopakuitua 4 mm seulalla.**



Kuva 5. Näytteestä löytynyt kumipala.

#### 4.4 Sideainetutkimukset

Kappaleista 1-5 uutetut sideainenäytteet yhdistettiin uuttosuodatuksen jälkeen kahteen erään yksittäisten näytteiden vähäisen sideainemäärän takia. Yhdistäminen päätettiin tehdä koekappaleiden massan mukaan, jolloin kumpaankin erään saatiin riittävä määrä sideainetta. Koekappaleiden 1, 3 ja 4 sideaine yhdistettiin näytteeksi 1+3+4 ja koekappaleiden 2 ja 5 sideaine näytteeksi 2+5. BitumenMix8 -rouheen sideaine on omana näytteenään, kuten myös kappaleiden 6-9 valmistukseen käytetty bitumi 160/220. Koekappaleista 6 ja 8 määritettiin maksimitiheys luvussa 4.3 esitetyn mukaisesti ja tästä rouheesta uutettiin yksi yhdistetty näyte sideainetta 6+8.

Taulukossa 14 on esitetty tunkeuma-arvot kullekin näytteelle. Näytteen 2+5 toinen mittausta poikkesi kahdesta muusta mittauksesta sallittua kahta millimetriä kymmenystä enemmän, joten tulos ei ole standardin mukaan hyväksyttävä. Näyte vaikutti epähomogeeniseltä tunkeumakuppiin kaadettaessa. Kuten luvussa 4.2 mainittiin, oli BitumenMix8-näytteen valuttaminen tunkeumakuppiin melko hankalaa ja siihen vaadittu pitkä lämmitysaika lienee vanhentanut sideainetta tarpeettomasti. Sideaine 160/220 oli päivätty vuonna 2009, eli se oli kuusi vuotta vanhaa näytteenottohetkellä, mikä selittää hieman tunkeumaluokan ulkopuolella olevan koetuloksen.

Taulukko 14. Sideainenäytteiden tunkeuma-arvot.

näyte	mittaus			keskiarvo
	1	2	3	
1+3+4	40,5	41,5	41	41,0
2+5	45	42	45	44,0
BitumenMix8	14,5	14	14	14,2
160/220	155	155	145,4	151,8
6+8	28	28	28	28,0

Sideainenäytteiden pehmenemispistemittausten tulokset on esitetty taulukossa 15. BitumenMix8-näytteen pehmenemispisteen määritettiin olevan vedessä 93,8 °C. Standardin SFS-EN 1427 mukaan 80 °C ylittävät mittaukset tulisi tehdä glyserolihauteessa, johon ei enää ollut aikaa laboratorion perusparannuksen alkamisen takia. Tulos on näin ollen viitteellinen. Standardin mukaan pehmenemispisteiden ero on vesi- ja glyserolihauteessa noin 4 °C, vesihauteessa määritetyn ollessa alempi. Tällöin BitumenMix8-näytteen pehmenemispisteen glyserolihauteessa voitaisiin arvioida olevan noin 97,8 °C. Pehmenemispistettä ei tutkittu näytteistä 160/220 ja 6+8 laboratorion perusparannuksen aiheuttamien aikataulupaineiden takia.

**Taulukko 15. Pehmenemispistemittausten tulokset.**

sideaine	näyte	pehmenemis- piste (°C)	keskiarvo lähimpään 0,2 °C
1+3+4	1	57,6	57,6
	2	57,7	
2+5	1	55,7	55,8
	2	55,9	
BitumenMix8	1	93,5*	93,8*
	2	94*	

\*vedessä, arvio glyserolihauteessa 97,8 °C SFS-EN 1427 mukaisesti

Taajuuspyyhkäisykokeiden tulokset on esitetty taulukoissa 16 ja 17. Taulukoissa on esitetty ainoastaan tulokset kulmataajuudella 10 rad/s tehdyistä mittauksista. Tällä kulmataajuudella tehdyt mittaukset ovat laatuvaatimusten perustana AASHTO:n sideaineiden arviointijärjestelmässä. Taulukossa on esitetty kullekin sideainenäytteelle ja lämpötilalle kompleksimoduuli  $G^*$ , vaihekulma  $\delta$ , kompleksimoduulin ja vaihekulma sinin tulo sekä kompleksimoduulin ja vaihekulman sinin suhde.

**Taulukko 16. Taajuuspyyhkäisykokeen tulokset, 10 rad/s, 0 - +30 °C**

näyte	suure	lämpötila (°C)				
		0	10	20	25	30
1+3+4	G* (Pa)	49,19 * 10 <sup>6</sup>	14,18 * 10 <sup>6</sup>	3,407 * 10 <sup>6</sup>	1,533 * 10 <sup>6</sup>	678,6 * 10 <sup>3</sup>
	δ (°)	28,94	36,81	45,9	50,65	55,13
	G*sinδ (Pa)	23,80 * 10 <sup>6</sup>	8,496 * 10 <sup>6</sup>	2,447 * 10 <sup>6</sup>	1,185 * 10 <sup>6</sup>	556,8 * 10 <sup>3</sup>
	G*/sinδ (Pa)	101,7 * 10 <sup>6</sup>	23,67 * 10 <sup>6</sup>	4,744 * 10 <sup>6</sup>	1,982 * 10 <sup>6</sup>	827,1 * 10 <sup>3</sup>
2+5	G* (Pa)	45,43 * 10 <sup>6</sup>	12,83 * 10 <sup>6</sup>	2,856 * 10 <sup>6</sup>	1,251 * 10 <sup>6</sup>	536,1 * 10 <sup>3</sup>
	δ (°)	30,05	38,29	48,14	53,04	57,67
	G*sinδ (Pa)	22,75 * 10 <sup>6</sup>	7,950 * 10 <sup>6</sup>	2,127 * 10 <sup>6</sup>	999,6 * 10 <sup>3</sup>	453,0 * 10 <sup>3</sup>
	G*/sinδ (Pa)	90,72 * 10 <sup>6</sup>	20,71 * 10 <sup>6</sup>	3,835 * 10 <sup>6</sup>	1,566 * 10 <sup>6</sup>	634,5 * 10 <sup>3</sup>
BitumenMix8	G* (Pa)	112,2 * 10 <sup>6</sup>	46,80 * 10 <sup>6</sup>	17,61 * 10 <sup>6</sup>	10,48 * 10 <sup>6</sup>	6,121 * 10 <sup>6</sup>
	δ (°)	20,81	25,86	31	33,7	36,42
	G*sinδ (Pa)	39,86 * 10 <sup>6</sup>	20,41 * 10 <sup>6</sup>	9,070 * 10 <sup>6</sup>	5,815 * 10 <sup>6</sup>	3,634 * 10 <sup>6</sup>
	G*/sinδ (Pa)	315,8 * 10 <sup>6</sup>	107,3 * 10 <sup>6</sup>	34,19 * 10 <sup>6</sup>	18,89 * 10 <sup>6</sup>	10,31 * 10 <sup>6</sup>
160/220	G* (Pa)	32,24 * 10 <sup>6</sup>	5,238 * 10 <sup>6</sup>	574,3 * 10 <sup>3</sup>	186,4 * 10 <sup>3</sup>	63,360 * 10 <sup>3</sup>
	δ (°)	40,15	56,86	71,63	76,39	80
	G*sinδ (Pa)	20,79 * 10 <sup>6</sup>	4,386 * 10 <sup>6</sup>	545,0 * 10 <sup>3</sup>	181,2 * 10 <sup>3</sup>	62,40 * 10 <sup>3</sup>
	G*/sinδ (Pa)	50,00 * 10 <sup>6</sup>	6,256 * 10 <sup>6</sup>	605,1 * 10 <sup>3</sup>	191,8 * 10 <sup>3</sup>	64,34 * 10 <sup>3</sup>
6+8	G* (Pa)	81,15 * 10 <sup>6</sup>	25,85 * 10 <sup>6</sup>	6,670 * 10 <sup>6</sup>	3,104 * 10 <sup>6</sup>	1,397 * 10 <sup>6</sup>
	δ (°)	25,3	32,61	41,38	46,34	51,17
	G*sinδ (Pa)	34,68 * 10 <sup>6</sup>	13,93 * 10 <sup>6</sup>	4,409 * 10 <sup>6</sup>	2,246 * 10 <sup>6</sup>	1,088 * 10 <sup>6</sup>
	G*/sinδ (Pa)	189,9 * 10 <sup>6</sup>	47,97 * 10 <sup>6</sup>	10,09 * 10 <sup>6</sup>	4,291 * 10 <sup>6</sup>	1,793 * 10 <sup>6</sup>

**Taulukko 17. Taajuuspyyhkäisykokeen tulokset, 10 rad/s, +40 - +90 °C**

näyte	suure	lämpötila (°C)					
		40	50	60	70	80	90
1+3+4	G* (Pa)	127,4 * 10 <sup>3</sup>	28,02 * 10 <sup>3</sup>	6965	1914	578,2	199
	δ (°)	63,16	69,39	75,15	80,52	84,48	86,96
	G* sin δ (Pa)	113,7 * 10 <sup>3</sup>	26,23 * 10 <sup>3</sup>	6732	1888	575,5	198,7
	G*/sin δ (Pa)	142,8 * 10 <sup>3</sup>	29,96 * 10 <sup>3</sup>	7206	1941	580,9	199,3
2+5	G* (Pa)	97,89 * 10 <sup>3</sup>	21,05 * 10 <sup>3</sup>	5158	1423	449,1	157
	δ (°)	65,61	71,74	77,35	82,16	85,53	87,57
	G* sin δ (Pa)	89,15 * 10 <sup>3</sup>	19,99 * 10 <sup>3</sup>	5033	1410	447,7	156,9
	G*/sin δ (Pa)	107,5 * 10 <sup>3</sup>	22,17 * 10 <sup>3</sup>	5286	1436	450,5	157,1
Bitumen-Mix8	G* (Pa)	1,763 * 10 <sup>6</sup>	593,2 * 10 <sup>3</sup>	208,4 * 10 <sup>3</sup>	80,47 * 10 <sup>3</sup>	33,74 * 10 <sup>3</sup>	14,59 * 10 <sup>3</sup>
	δ (°)	41,42	44,93	47,31	49,03	51,69	56,15
	G* sin δ (Pa)	1,166 * 10 <sup>6</sup>	418,9 * 10 <sup>3</sup>	153,2 * 10 <sup>3</sup>	60,76 * 10 <sup>3</sup>	26,47 * 10 <sup>3</sup>	12,17 * 10 <sup>3</sup>
	G*/sin δ (Pa)	2,665 * 10 <sup>6</sup>	839,9 * 10 <sup>3</sup>	283,5 * 10 <sup>3</sup>	106,6 * 10 <sup>3</sup>	43,00 * 10 <sup>3</sup>	17,57 * 10 <sup>3</sup>
160/220	G* (Pa)	10,08 * 10 <sup>3</sup>	1960	484,1	154,2	57,92	25,16
	δ (°)	84,43	87,11	88,87	89,59	90	90
	G* sin δ (Pa)	10,03 * 10 <sup>3</sup>	1958	484	154,2	57,92	25,16
	G*/sin δ (Pa)	10,13 * 10 <sup>3</sup>	1962	484,2	154,2	57,92	25,16
6+8	G* (Pa)	266,8 * 10 <sup>3</sup>	58,82 * 10 <sup>3</sup>	14,37 * 10 <sup>3</sup>	3880	1121	365,1
	δ (°)	59,51	66,06	71,83	77,48	82,28	85,67
	G* sin δ (Pa)	229,9 * 10 <sup>3</sup>	53,76 * 10 <sup>3</sup>	13,65 * 10 <sup>3</sup>	3788	1111	364,1
	G*/sin δ (Pa)	309,6 * 10 <sup>3</sup>	64,36 * 10 <sup>3</sup>	15,12 * 10 <sup>3</sup>	3975	1131	366,1

Amplitudipyyhkäisytestin tulos väsymisparametrille  $N_f$  eri muodonmuutoksilla  $\gamma$  sekä parametrit  $A$  ja  $B$  on esitetty taulukossa 18.

**Taulukko 18. Amplitudipyyhkäisytestin tulokset sideainenäytteille.**

näyte	A	B	$\gamma = 2,5 \%$	$\gamma = 5 \%$
1+3+4	980529,27	-4,74	12748	477
2+5	525025,93	-4,48	8622	385
BitumenMix8	3008049,98	-6,83	5752	51
160/220	68834,26	-2,63	6159	992
6+8	3705505,95	-5,35	27532	675

MSCR-kokeen tulokset on esitelty taulukossa 19, jossa  $J_{nr100}$  on palautumaton virumismyötääminen 100 kPa leikkausjännityksestä,  $J_{nr3200}$  3200 kPa leikkausjännityksestä ja  $J_{nr6400}$  6400 kPa leikkausjännityksestä. Vastaavasti  $R$  on sideaineen muodonmuutoksen keskimääräinen palautumaprosentti kunkin erisuuruuden kuormituksen jälkeen. Negatiiviset tulokset näytteelle 160/220 johtuvat reometrin mittavirheestä. Virheen aiheuttaa sideaineen poistuminen levyjen välistä suurilla leikkausjännityksillä, sillä sideaine on liian pehmeää levyjen välissä pysyäkseen koelämpötilassa 50 °C. BitumenMix8 -näyte oli puolestaan erittäin voimakkaasti muodonmuutosta vastustavaa, ja tämä näkyy kasvavana palautumaprosenttina suuremmilla leikkausjännityksillä.

**Taulukko 19. MSCR-kokeen tulokset.**

näyte	J <sub>nr100</sub> (1/kPa)	J <sub>nr3200</sub> (1/kPa)	J <sub>nr6400</sub> (1/kPa)	R100 (%)	R3200 (%)	R6400 (%)
1+3+4	0,135	0,147	0,169	41,698	35,872	27,867
2+5	0,258	0,291	0,335	31,317	23,891	16,424
BitumenMix8	0,001	0,001	0,000	90,549	90,729	92,515
160/220	5,719	6,117	6,318	0,114	-1,622	-1,985
6+8	0,066	0,068	0,074	46,786	44,417	40,303

Fraass-murtumapisteen määrittämisen tulokset on esitelty taulukossa 20. Laboratorion perusparannuksen aiheuttamien aikataulupaineiden vuoksi ainoastaan näytteiden 1+3+4 ja 2+5 tutkiminen oli mahdollista.

**Taulukko 20. Fraass-murtumapisteen määrittämisen tulokset.**

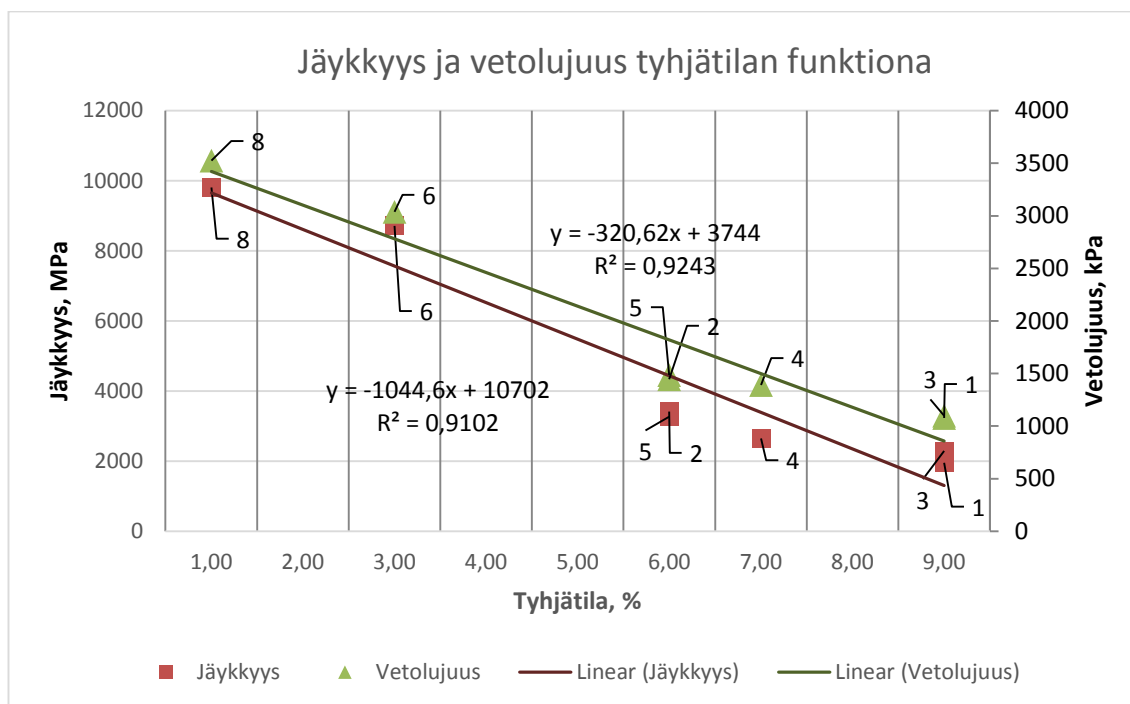
sideaine	näyte	taivutus alkoi (°C)	murtumapiste (°C)	keskiarvo (°C)
1+3+4	1	-9,6	-19	-19
	2	-10,5	-19,1	
2+5	1	-9,1	-20,9	-20
	2	-10,2	-19,9	



## 5 Tutkimustulosten tarkastelu

### 5.1 Asfalttimassatutkimukset

Koekappaleiden 1-5 jäykkyys ja halkaisuvetolujuus olivat suhteellisen alhaisia, ja niiden tyhjätilat olivat suhteellisen suuria. Koekappaleiden 6-9 jäykkyys ja halkaisuvetolujuus olivat suhteellisen korkeita ja niiden tyhjätilat suhteellisen pieniä. Koekappaleen 8 halkaisuvetolujuutena on käytetty koelaitteen maksimipuristusvoiman 25 kN mukaista laskennallista minimiä 3525 kPa, koska kappaletta 8 ei saatu halki koelaitteella. Kuvassa 6 on esitetty koekappaleiden 1-5, 6 ja 8 jäykkyydet ja halkaisuvetolujuudet tyhjätilan funktiona sekä niiden regressiosuorat. Tyhjätilan korrelaatio sekä jäykkyyden että halkaisuvetolujuuden kanssa on varsin vahva,  $R^2 > 0,91$  kummassakin tapauksessa.



Kuva 6. Jäykkyys ja vetolujuus tyhjätilan funktiona.

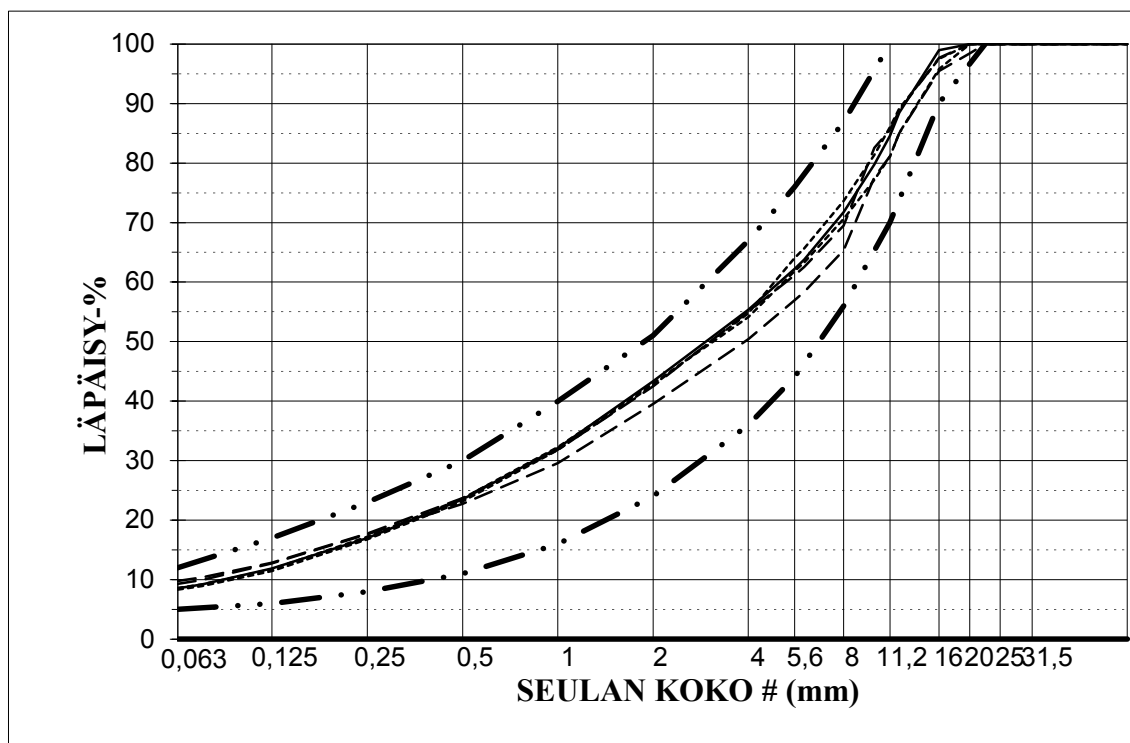
Suuri tyhjätila poranäytteistä valmistetuissa koekappaleissa 1-5 viittaa levitetyn asfalttimassan vähäiseen tiivistämiseen. Toisaalta koekappaleiden 6 ja 8 varsin suuret jäykkyydet viittaavat sideaineen tavoitetta suurempaan jäykkyyteen, kun huomioidaan, että Destian (2015) tekemien toiminnallisten kokeiden AB16-referenssimassan halkaisuvetolujuus oli 2009 kPa ja tyhjätila oli 1,9 %. Referenssimassan kiviaineksen rakeisuus ja käytetty sideaine 70/100 vastasi kappaleiden 6-9 valmistukseen käytetyn massan tavoiteltua koostumusta. Kappaleiden 6-9 massan sideaine oli selvästi jäykempää (tunkeuma  $28 \cdot 10^{-1}$  mm) kuin Destian valmistama referenssimassan sideaine 70/100 (tunkeuma  $74 \cdot 10^{-1}$  mm).

Destian valmistaman huoparouhemassan sideaine oli niin ikään tekijän laboratoriossa valmistaman massan sideainetta pehmeämpää, sen tunkeuman ollessa  $85 \cdot 10^{-1}$  mm. Destian huoparouhemassan sekoitussuhteet poikkesivat hieman kappaleiden 6-9 massasta; Destian massassa kattohuoparouhetta lisättiin kolme massaprosenttia ja bitumia 160/220 3,74 massaprosenttia. On yllättävää, että suuremmalla kattohuoparouheen määrällä saatiin aikaiseksi huomattavasti pehmeämpi sideaineseos, etenkin kun Destian kokeissa käytetyn kattohuoparouheen sideaineen tunkeumaksi oli mitattu  $15 \cdot 10^{-1}$  mm, ja tekijän saaman näytepussin kattohuoparouheen sideaineen tunkeumaksi mitattiin

$14 \cdot 10^{-1}$  mm. Mahdollinen syy tälle eroavuudelle on sekoituslämpötila; tekijän laboratoriossa valmistaman massan sekoituslämpötila oli  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kun Destia käytti sekoituksessa lämpötilaa  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vaikka Zhang et al. (2015) ei tätä todennäköisenä pidäkään. Korkeampi lämpötila on voinut johtaa kattohuoparouheeseen ja bitumin 160/220 homogeenisempaan sekoittumiseen, jolloin sekoitetun sideaineen ominaisuudet ovat lähellä tavoiteltua 70/100-tunkeumaluokiteltua bitumia. Toisaalta eroavuudet sekoitusajassa ja -tavassa ovat voineet vaikuttaa sideaineen sekoittumiseen merkittävästi.

Tavoitteena olleen AB 16-massaan käytettävä Asfalttinormit 2011 mukaisen sideaineen tulee olla 35/50...160/220 -tunkeumaluokiteltua, joten tältä osin – kuten myös sideainepitoisuutensa puolesta – poranäytteiden massa täytti laatuvaatimukset. Laboratoriossa valmistetun massan sideaineen tunkeuma ei täyttänyt tätä vaatimusta, mutta edellä esitellyt massan valmistusprosessiin liittyvät kysymykset ovat voineet vähentää sideainekomponenttien sekoittumista. Muita Asfalttinormien mukaisia laatuvaatimuksia poranäytteille ei ollut, koska kohteena olevaa teollisuuskiinteistön pihaa eivät mitkään muut vaatimukset koske, eikä tilaaja ollut määritellyt tyhjätilalle mitään tavoitearvoa.

## 5.2 Kiviainestutkimukset

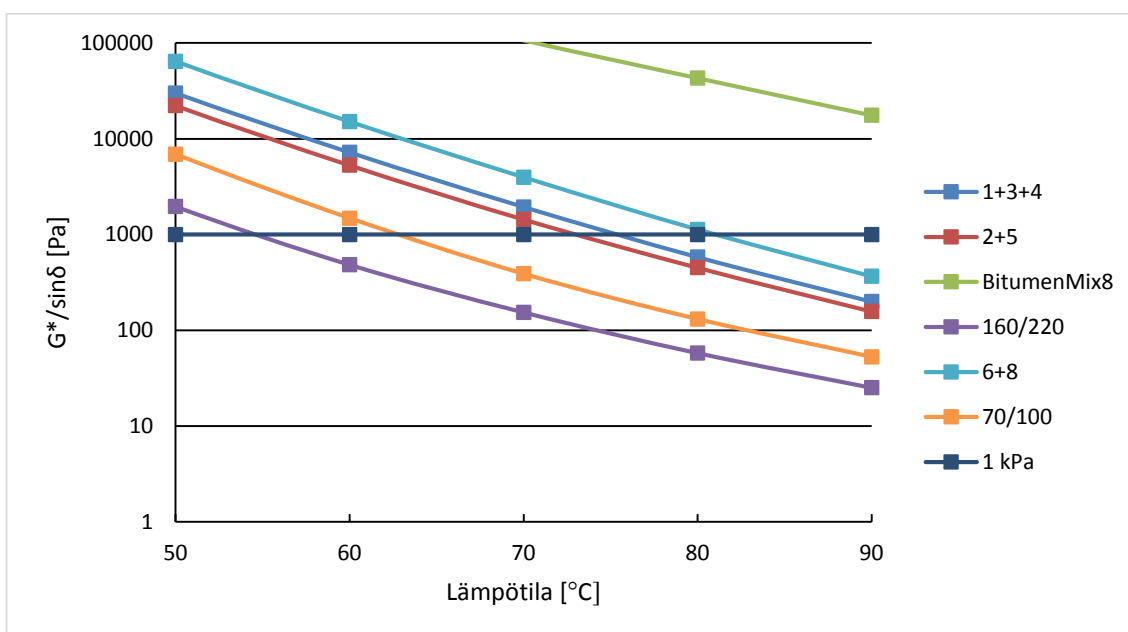


Kuva 7. Poranäytteiden (koekappaleet 1-5) rakeisuuskäyrät ja AB16-massan PANK-normin ohjekäyrät.

Kuvassa 7 on esitetty poranäytteiden 1-5 kiviaineksen rakeisuudet katko- ja pisteviivoin sekä Asfalttinormit 2011 mukaisen AB16-massan tavoiterakeisuuden ylä- ja alarajat (kaksoispiste-katkoviivat) sekä tavoiterakeisuuden keskiarvo (yhtenäinen viiva). Poranäytteiden sisältämä kiviaines oli varsin hyvin tavoiterakeisuuden mukaista. Poranäytteiden kiviaines käytettiin uuttosuodatuksen ja seulonnan jälkeen sellaisenaan näytteiden 6-9 valmistamiseen, joten voidaan olettaa kaikkien tutkittujen koekappaleiden kiviaineksen rakeisuuden olleen tavoitteen mukainen.

### 5.3 Sideainetutkimukset

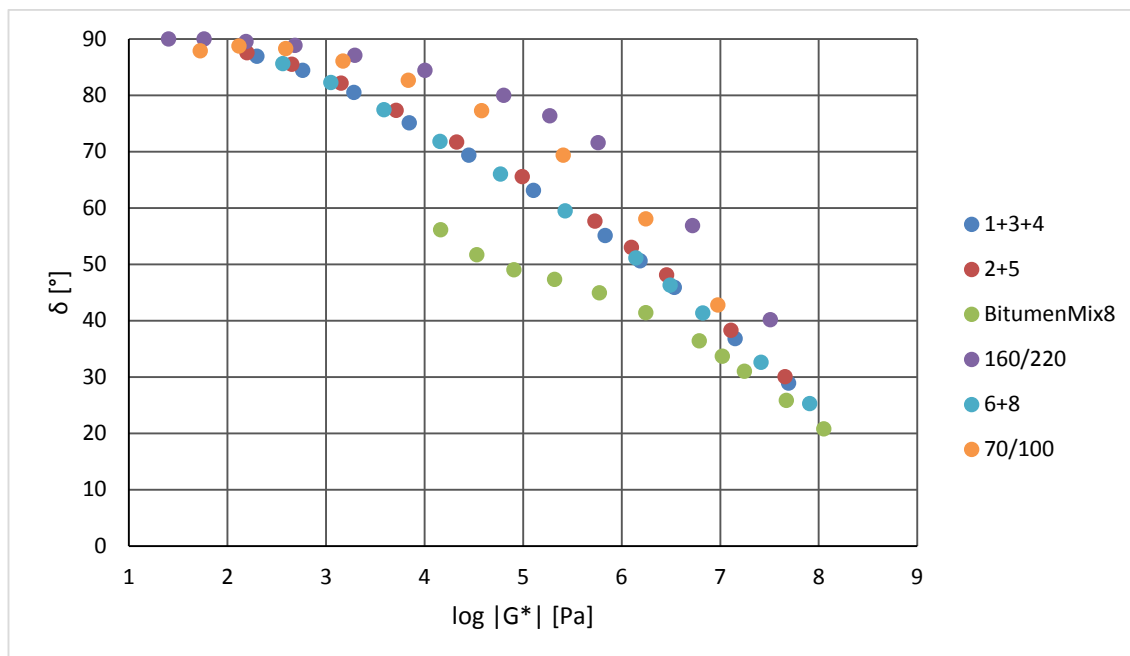
Reologisten tutkimusten tuloksia on tässä verrattu Lehtimäen diplomityössään (2012) esittämiin tuloksiin 70/100-tunkeumaluokitellulle bitumille. Kuvassa 8 on esitetty  $G^*/\sin\delta$  -tunnusluku lämpötilan funktiona eri sideaineille taajuuspyyhkäisytestitulos. Mitä suurempi tunnusluku on, sitä jäykempää sideaine on. Lisäksi kuvaan 8 piirretty 1 kPa kriittinen raja on AASHTOn standardin M320 mukainen  $G^*/\sin\delta$  -tunnusluvun raja-arvo, joka määrittää ylimmän sallitun käyttökohteessa vallitsevan lämpötilan kyseenomaiselle sideaineelle. Raja-arvo kuvaa noin 70 km/h etenevän ajoneuvon aiheuttaman muodonmuutoksen pysyvyyttä, toisin sanoen esimerkiksi sideaineen 70/100 pitäisi kestää esitetyn kaltainen kuormitus kokematta pysyvää muodonmuutosta vielä hieman alle 65 °C lämpötilassa (Lehtimäki 2012). On tärkeää havaita, että yhdistämällä pehmein tutkittu sideaine 160/220 ja jäykin tutkittu sideaine BitumenMix8 ei ole saavutettu tavoitetulta 70/100 käyrää, vaan sekä laboratoriossa valmistettu näyte 6+8 että poranäytteistä uutetut näytteet 1+3+4 ja 2+5 ovat jääneet huomattavasti 70/100-sideainetta jäykemmiksi ja kestävät kuormitusta vielä suhteellisen korkeissa käyttölämpötiloissa lämpötila-alueella 70-80 °C. Sideaineen 160/220 ylin käyttölämpötila on hieman yli 55 °C, kun taas odotetusti huopakattorouheen sideaineen BitumenMix8 -näytteelle ei tällaista rajaa löytynyt vielä 90 °C mennessä.



Kuva 8.  $G^*/\sin\delta$  -tunnusluku lämpötilan funktiona eri sideaineille ja 1 kPa kriittinen raja. 70/100 Lehtimäki (2012).

Kuvassa 9 on esitetty niin kutsuttu Black diagram taajuuspyyhkäisytestitulos. Vaaka-akselilla on esitetty kompleksimoduulin 10-kantainen logaritmi ja pystyakselilla kompleksimoduulia vastaava vaihekulma. Vaihekulman ollessa 90 ° on sideaineen viskoelastinen käytös täysin viskoosista ja vastaavasti vaihekulman ollessa 0 ° on käytös täysin elastista. Mikäli mittausvirheitä ei ole tapahtunut, tulisi käyrien muodostaa melko yhtenäisiä kaaria, kuten kaikkien sideaineiden käyrät tekevätkin lukuun ottamatta kattorouheeseen BitumenMix8 -käyrää. Edes korkeimmassa testilämpötilassa 90 °C sideaine ei saavuta täysin viskoosista käytöstä ja voi olla etteivät käytetyn testiohjelman parametrit sovellu näin jäykän aineen mittaamiseen. Muissakin reologisissa testeissä huopakattorouheesta uutettu sideaine käyttäytyi odotuksista poiketen. On mahdollista että huopakattorouheesta uutetun bitumin joukossa on kumimaista lisäainetta, mikä selittäisi sen poikkeavan reologisen käytöksen.

Sideaineen 160/220 käyrä on odotetun kaltaisesti korkeimpana ja sideaineen 70/100 käyrä sen alapuolella. Kaikki huopakattorouheesta valmistettujen koekappaleiden sideaineet käyttäytyivät eri lämpötiloissa huomattavan samankaltaisesti ja jäivät selvästi sideaineen 70/100 käyrän alapuolelle, joten tavoiteltua massan sideaineen koostumusta ei saavutettu sideaineen 160/220 ja kattohuoparouheen sideaineen sekoituksella.



Kuva 9. Taajuuspyyhkäisytestin tuloksista piirretty Black diagram -kuva. 70/100 Lehtimäki (2012).

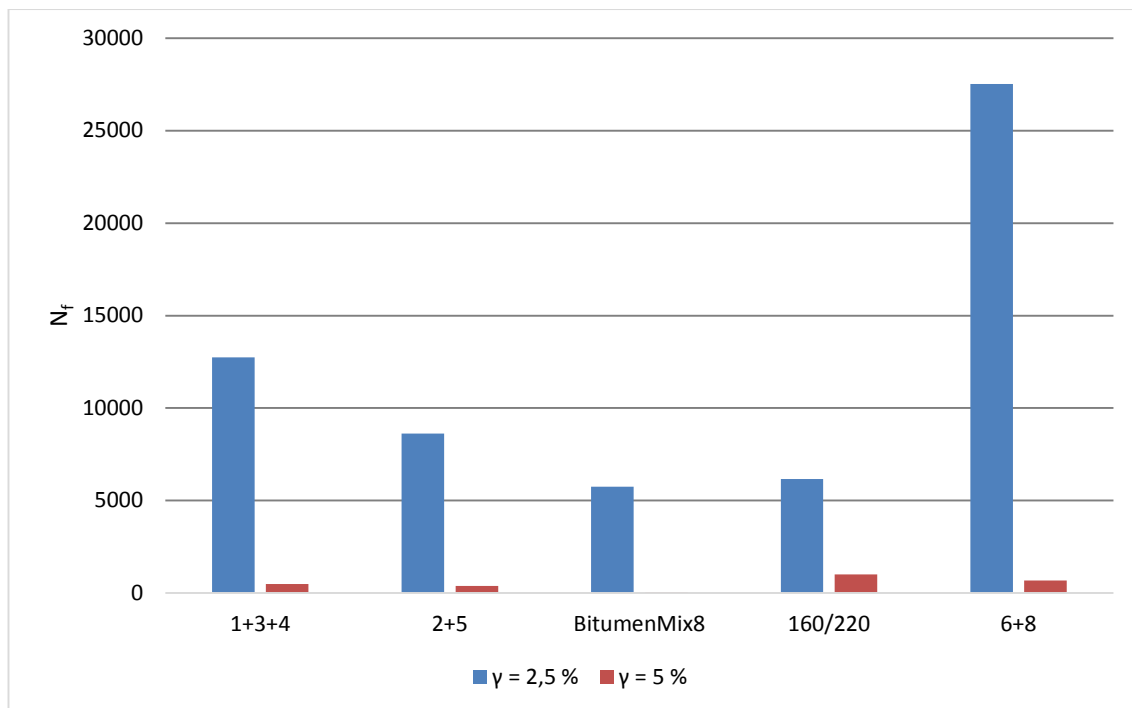
Lineaarisen amplitudipyyhkäisytestin tulokset esitetty graafisesti kuvassa 10. Pystyakselilla esitetty  $N_f$  on näytteen kestävä kuormituksen määrä ennen sallitun suurimman pysyvän muodonmuutoksen syntymistä. Kunkin näytteen kaksi pylvästä kuvaavat vaurioparametri  $N_f$ :n suuruutta sallitulla maksimimuodonmuutoksella yli ja alle neljän tuuman paksuisille päällysteille. Teymourpour & Bahia esittivät tämän reologisen kokeen lisäämistä 2014 AASHTO MP-19 -standardiin, jossa on jo olemassa liikennemäärään sidottu kuormitusluokka. Ehdotuksessa määriteltiin testilämpötilaksi sideaineen PG-luokituksen mukaisen käyttölämpötila alueen keskiarvo eli käyttökohteen keskimääräinen vuotuinen lämpötila. Taulukossa 21 on esitetty päällysteen elinkaaren aikainen eri standardiakselien ylitysmäärä kullekin kuormitusluokalle ja sitä vastaava vaurioparametrin arvo testilämpötilassa.

Taulukko 21. AASHTO MP-19 mukaiset kuormitusluokat ja niitä vastaavat vaurioparametrin  $N_f$  arvot. (Teymourpour & Bahia, Zipf).

	N <sub>f</sub>	
Traffic Grade	10 <sup>6</sup> ESAL	(γ=2,5 % tai γ=5 %)
Standard	<3	>15000
Heavy	3-10	>19000
Very Heavy	10-30	>31000
Extreme	>30	>31000

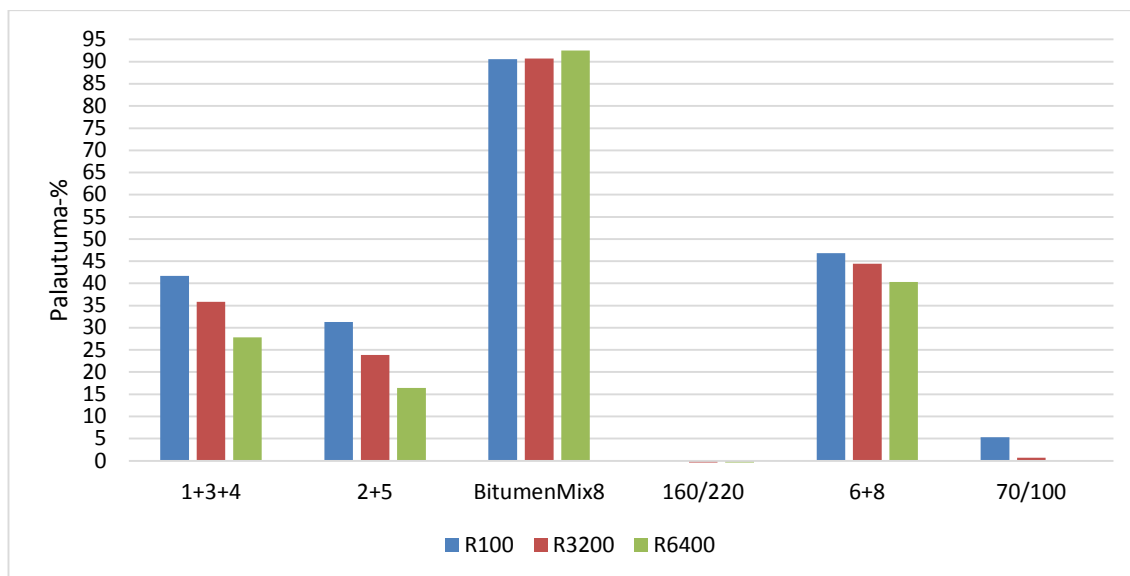
Tulosten perusteella voidaan sanoa, että ainoastaan sideainenäyte 6+8 täytti kriteerin edes Standard-luokan liikenteelle käyttökohteessa päällysteen paksuuden ollessa yli neljä tuumaa, ja kohteen keskilämpötilan ollessa 10 °C. Sekä tutkimuksen jäykin että

pehmein sideaine eivät kumpikaan kestäneet merkittävää kuormitusta ja myös poranäytteistä uutetut sideainenäytteet jäivät Teymoupour & Bahian (2014) ehdottamista lisäyksistä pohjoisamerikkalaisiin vaatimuksiin huomattavasti. Testilämpötilan muuttaminen olisi voinut lisätä toisten sideaineiden kestävyystuloksia ja heikentää toisten.

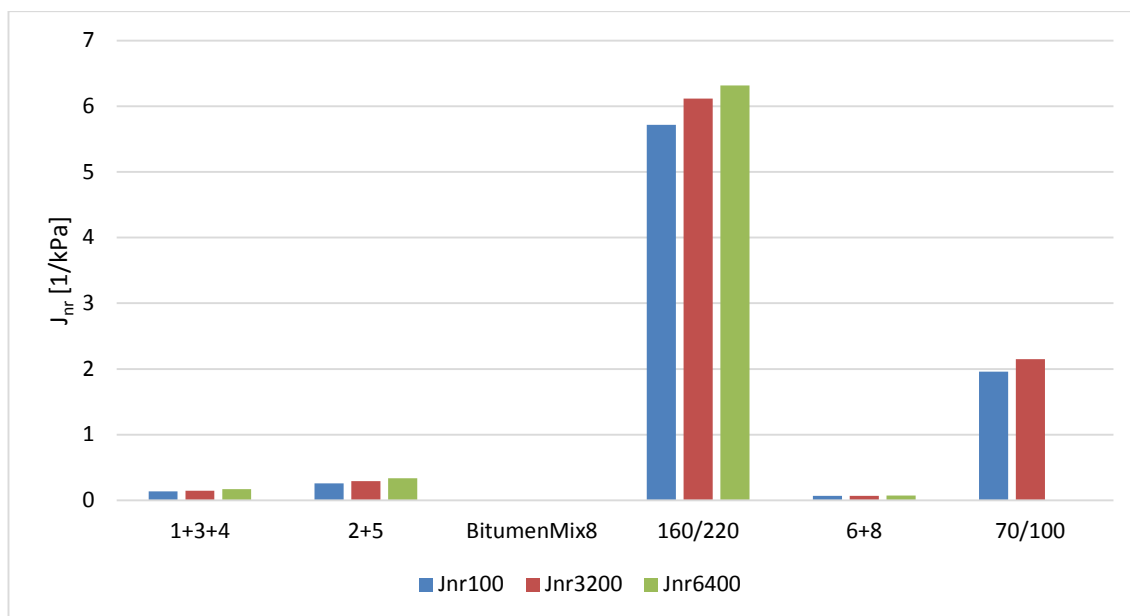


**Kuva 10. Lineaarisen amplitudipyhkäisyn tulokset pylväskaaviona.**

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty MSCR-kokeen tulokset ja Lehtimäen (2012) esittämät tulokset 70/100-sideaineelle. Kuvassa 11 kunkin sideainenäytteen keskimääräinen palautumaprosentti on esitetty kolmelle eri koejännitykselle. Testilämpötilassa 50 °C tuore sideaine 160/220 ei juurikaan enää palautunut edes 100 kPa jännityksestä. Sen sijaan huopakattorouheesta uutettu sideaine BitumenMix 8 vastusti muodonmuutosta lähes täysin. Laboratoriossa valmistetun massan sideaine 6+8 vastusti muodonmuutosta huomattavasti enemmän kuin poranäytteiden sideainenäytteet 1+3+4 ja 2+5. Tulosten perusteella on selvää, että huopakattorouhetta sisältävien massojen sideaineet olivat huomattavasti jäykempiä ja pysyvää muodonmuutosta kestäviä kuin tavoitteena ollut 70/100-sideaine. Kuvassa 12 esitetyt palautumattoman myötäyksen keskiarvot tukevat tätä havaintoa.



**Kuva 11. MSCR-kokeessa mitattu keskimääräinen palautuma prosentti eri jännitystasoilla. 70/100 Lehtimäki (2012).**



**Kuva 12. MSCR-kokeessa mitatut keskimääräiset palautumattomat myötäykset eri jännitystasoilla. 70/100 Lehtimäki (2012).**

Fraass-murtumapistekokeen tulokset poranäytteistä uutetuille sideainenäytteille 1+3+4 ja 2+5 olivat 19 °C ja 20 °C vastaavasti ja Lehtimäen (2012) diplomityössään käyttämän 70/100-sideaineen Fraass-murtumapiste myös 20 °C. Tämän kokeen tuloksissa huopakattorouheesta uutettu sideaine vastasi ominaisuuksiltaan tavoiteltua 70/100-sideainetta.

## 6 Yhteenveto ja päätelmät

Kierrätetyn huopakattorouheen käyttäminen asfalttimassoissa voisi tuoda huomattavia säästöjä ainakin raakaöljyn tuontiin ja prosessointiin tuoreen bitumin tarpeen jopa 5 % vähentämisellä. Kierrätystoiminnan alettua on tärkeää kuitenkin varmistua tuotteen soveltuvuudesta paikallisiin käyttöoloihin. Nykyhetken säästötarve kaikilla yhteiskunnan tahoilla on merkittävä, mutta väärin käytettynä huopakattorouheen lisääminen asfalttimassaan saattaisi lisätä päällysteiden korjaustarvetta enemmän kuin se mahdollisesti säästäisi. Ympäristönäkökulma on myös tärkeä ottaa huomioon mahdollista hyötyarvointia tehtäessä.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, soveltuuko kierrätetty huopakattorouhe asfalttipäällysteisiin kotimaisten tarpeiden kannalta. Kirjallisuuskatsauksessa kartoitettiin huopakattorouheen asfalttimassassa käytön tutkimusta. Yleisesti kirjallisuudessa oli päädytty kierrätetyn kattohuopamateriaalin käytön kannalle. On kuitenkin huomioitava että huopakattorouheen käytön ollessa Euroopassa vielä lapsenkengissään, oli saatavilla oleva kirjallisuus pohjoisamerikkalaista. Siksi tutkittavien ominaisuuksien rajaaminen kotimaisiin normeihin ja laatuvaatimuksiin oli hankalaa. Täysin eri sideaineen ominaisuuksiin perustuvat arviointijärjestelmät eivät mahdollista helppoa vertailua aiemman tutkimuksen ja tässä työssä käsiteltävien kysymysten välillä. Ulkomainen tutkimus on todennut kierrätetyn huopakattomateriaalia sisältävät asfalttimassat kelpoiksi liikennekäyttöön, mutta pohjoisamerikkalainen luokitusjärjestelmä pohjautuu lähinnä kulumiskestävyyden maksimointiin, joten monissa tutkimuksissa keskeisimpänä tuloksena todettiin huopakattorouheesta valmistetun asfalttimassan olevan erinomaista juuri urautumis- ja muodonmuutoskestävyydeltään. Lisäksi tutkimukset keskittyivät lähinnä lämpimän ja subtrooppisen ilmanalan osavaltioihin Yhdysvalloissa, joten laatuvaatimukset, joihin tuloksia verrattiin olivat täysin erilaisia kuin kotimaahan soveltuvat. Sideaineiden kylmäkestävyysominaisuuksien arveltiin olevan huonompia kuin tuoreen sideaineen. Kylmempään ilmastoon soveltuvien luokitusperusteiden käyttö kriteereinä tuotti suosituksen käyttää pehmeämpää sideainetta massan valmistuksessa huopakattorouheen ohella. Lisäksi tuoreen sideaineen ja huopakattorouheen sisältämän sideaineen sekoitumista oli tutkittu ja havaittu, ettei se ole niin täydellistä kuin voisi toivoa.

Laboratorio-osuudessa tutkittiin huopakattorouheesta valmistetusta AB 16-päällysteestä otettuja poranäytteitä. Poranäytteet oli otettu teollisuuskiinteistön pihalle levitetystä päällysteestä, joten niihin kohdistuvat laatuvaatimukset olivat erittäin vähäisiä. Massan sideaine täytti vaatimuksen sideaineen tunkeumaluokituksesta ja tyhjätilavaatimusta ei ollut annettu, joten erittäin suuret tyhjätilat poranäytteissä eivät tässä yhteydessä vaikuta arvioon massan laadusta. Tiepäällysteenä tätä massaa ei olisi kuitenkaan sellaisenaan voinut käyttää. Laboratoriossa valmistetut koekappaleet olivat kiertotiivistimellä erittäin tiiviiksi puristettuja ja ne olivat erittäin jäykkiä. Osaltaan jäykkyyteen vaikutti sideaineen poranäytteitä suurempi jäykkyys. On mahdollista, että massan valmistusprosessi tai käytetty kattohuoparouhe erosi poranäytteiden massan valmistukseen käytetyistä riittävästi erojen luomiseen. Missään tapauksessa tuloksena syntynyt sideaineseos ei ollut ominaisuuksiltaan edes lähellä tavoitteeksi ajateltua 70/100-sideainetta. Samankaltaisella, mutta kaksinkertaisen määrän huopakattorouhetta sisältäneellä suhteituksella Destian valmistama massa oli toisaalta ominaisuuksiltaan ja sideaineseokseltaan täysin tuoreesta 70/100-sideaineesta valmistetun AB 16-massan kaltaista.

Sideainenäytteille tehdyt reologiset kokeet osoittivat huopakattorouheesta valmistettujen massojen sisältämän sideaineen olevan suhteellisen jäykkää ja tuoretta sideainetta huomattavasti deformaatiokestävämpää. Tutkimukseen olisi mahdollisesti pitänyt sisäl-



lyttää 35/50-sideaine, mutta laboratorion perusparannuksen takia osa jo tähänkin työhön saaduista kokeista jäi tekemättä. Joka tapauksessa tässä tutkimuksessa käsiteltyjen massojen sisältämä sideaine ei ollut sekoittuessaan saanut 70/100-sideaineen reologisia ominaisuuksia. On lisäksi mielenkiintoista, että amplitudipyyhkäisykokeen testilämpötilassa 10 °C sekä jäykin että pehmein sideaine pettivät. Vaurioparametrin tutkiminen eri lämpötiloissa voisi tuottaa hyödyllisiä tuloksia.

Jatkotutkimus on tarpeen sideaineiden perinteisempien menetelmien ja reologisten tutkimusten tulosten rinnastamiseen. Tekijä pitää mahdollisena, että vaikka sekoittamalla kattohuoparouhetta ja pehmeämpää sideainetta massan valmistusprosessissa oikealla suhteella saataisiin tunkeumaluokitukseltaan vaatimuksia vastaavaa sideainetta, voivat vanhentuneen huopakattorouheen sisältämän sideaineen muut ominaisuudet lisätä massan sideaineseoksen jäykkyyttä ja muuttaa sen käyttökelpoisuutta joko paremmaksi tai huonommaksi. Käytännön kokeet esimerkiksi katukohteen päällystämällä huopakattorouhetta sisältävällä massalla ja pitkäaikaisen seurantatutkimuksen avulla voisivat tuoda kierrätetyn huopakattorouheen käytöstä arvokasta kokemuseräistä tietoa. Toisaalta jo tässä työssä tehtyä laajempi laboratoriotutkimus antaisi huomattavaa lisätietoa huopakattorouhetta sisältävän massan toiminnallisista ominaisuuksista.

## Lähdeluettelo

Dorè, G. & Zubeck, H. K. 2009. Cold Regions Pavement Engineering. Virginia, USA. ASCE. 416 s. ISBN 978-0-07-160088-4.

Foo, K., Hanson, D. & Lynn, T. 1999. Evaluation of Roofing Shingles in Hot Mix Asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 11:1, S. 15–20. ISSN 0899-1561.

Grzybowski, K. F. 1993. Recycled Asphalt Roofing Materials – A Multi-Functional, Low Cost Hot-Mix Asphalt Pavement Additive. Teoksessa: Waller, H. F. (toim.) Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt. STP 1993. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials. S. 159-179. ISBN 978-0-8031-1881-2.

Lehtimäki, H. 2012. Asfalttirouheen elvyttäminen keveillä öljytuotteilla. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 105 s.

Nam, B., Maherinia, H., Behzadan, A.H. 2014. Mechanical characterization of asphalt tear-off roofing shingles in Hot Mix Asphalt. Construction and Building Materials. Vol 50, S. 308-316. ISSN 0950-0618.

Newcomb, D.E, Stroup-Gardiner, M., Weikle, B. M., Drescher, A. 1993. Properties of Dense-Graded and Stone-Mastic Asphalt Mixtures Containing Roofing Shingles. Teoksessa: Waller, H. F. (toim.) Use of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt. STP 1993. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials. S. 145-158. ISBN 978-0-8031-1881-2.

PANK ry. 2011. Asfalttinormit 2011. Vantaa: Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. ISBN 978-952-99985-1-7.

SFS-EN 12593. 2007. Bitumen and bituminous binders. Determination of the Fraass breaking point. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-5. 2010. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-6. 2012. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-8. 2003. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-23. 2004. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 23: Determination of the Indirect Tensile Strength of Bituminous Specimens. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-26. 2012. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 12697-29. 2003. Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 1426. 2007. Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 1427. 2007. Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

Tarpaper Recycling Finland Oy. 2014. Purkubitumit uusiokäyttöön – kattuhuopa hyötykäyttöön asfalttiteollisuuden uusioraaka-aineena. Tiedote.

Teymourpour, P. & Bahia, H. 2014. Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation. Binder Expert Task Group Meeting. Baton Rouge, Louisiana, USA. Esityskalvot. Saatavilla:

[http://www.asphaltpavement.org/PDFs/Engineering\\_ETGs/Binder\\_201409/Teymourpour\\_LAS%20Test\\_Binder%20Grading%20Specification%20and%20Field%20Validation.pdf](http://www.asphaltpavement.org/PDFs/Engineering_ETGs/Binder_201409/Teymourpour_LAS%20Test_Binder%20Grading%20Specification%20and%20Field%20Validation.pdf)

TP 101-14. 2013. Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, D.C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Tuppurainen, A., Suvanto, S., Mutikainen, M., Gaasenbeek, N. & Parkkola, E. 2014. End of waste. Kipsilevy- ja kattohuopajäte. Jyväskylä: Ramboll Finland Oy. Raportti Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy:lle.

Yang, J., Ddamba, S., UL-Islam, R., Safiuddin, Md., Tighe, S.L. 2013. Investigation on use of recycled asphalt shingles in Ontario hot mix asphalt: a Canadian case study. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol 43, S. 136-143. ISSN 1208-6029.

Zhao, S., Bowers, B., Huang, B., Shu, X. 2014. Characterizing Rheological Properties of Binder and Blending Efficiency of Asphalt Paving Mixtures Containing RAS through GPC. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 26:5. S. 941-946. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000896.

Zhao, S., Nahar, N.S, Schmets, A.J.M, Huang, B., Shu, X., Scarpas, T. 2015. Investigation on the microstructure of recycled asphalt shingle binder and its blending with virgin bitumen. Road Materials and Pavement Design. Vol. 16:sup1. S. 21-38, DOI: 10.1080/14680629.2015.1030911.

Zipf, K. 2014. Grading Asphalt Binders with the Multiple Stress Creep Recovery Test AASHTO TP-70 and MP-19. Delaware Department of Transportation. Esityskalvot. Saatavilla: <https://sites.udel.edu/dct/files/2014/06/MSCR-Summary-2014-1slqw08.ppt>